

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERIA AGRONÓMICA

“Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), enfocado al sector urbano de la ciudad de Cuenca utilizando teledetección y análisis espacial”

***Tesis previa a la obtención del título
de Ingeniero Agrónomo***

AUTOR:

Luis Miguel Sánchez Vega

DIRECTOR:

Blgo. Daniel Augusto Orellana Vintimilla Ph.D

CUENCA – ECUADOR
2017

Resumen

El deterioro de la calidad ambiental es un problema a nivel mundial que se ve acrecentado en ciudades con un alto desarrollo industrial y crecimiento demográfico, existiendo la necesidad de generar políticas públicas que permitan abordar estos problemas. Se requiere generar información que sintetice la realidad ambiental de una zona, para lo cual se propone la construcción de índices de calidad ambiental. En la presente investigación se plantea la generación de indicadores derivadores de imágenes satelitales Landsat 8 y de información secundaria de la ciudad de Cuenca para los años 2014 y 2015, obteniendo ocho indicadores: índice de vegetación normalizado (NDVI), de humedad en las hojas (LWCI), de suelos normalizado (NSI) y de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI), temperatura de superficie (TS), concentraciones de dióxido de nitrógeno y ozono y niveles de ruido. Estos se sintetizan en índices de calidad ambiental urbanos a nivel de celdas hexagonales construidos a través de dos metodologías, análisis multicriterio y análisis de componentes principales. Se determinó que la metodología de análisis de componentes principales representa de mejor manera la ciudad, agrupando categorías de calidad ambiental favorable en sectores con altas humedades e índices altos de vegetación así como bajas temperaturas y menores concentraciones de contaminantes atmosféricos; y, en sectores con calidad ambiental deteriorada con efectos de islas de calor, altas concentraciones de dióxido de nitrógeno, suelo desnudo con baja cantidad de humedad y mayor cantidad de área construida, los cuales requieren una intervención prioritaria por las entidades de planificación ambiental urbana.

Palabras clave: Sensores remotos, índice de calidad ambiental, contaminantes atmosféricos, análisis multicriterio, análisis de componentes principales, índices de vegetación.

Abstract

Environmental quality deterioration is an increasing global problem, especially in cities with high industrial development and demographic growth, demanding the establishment of public policies that confront these issues. Data generation is required to represent the environmental reality of a place, for which environmental quality index can be applied. The current research aims for the construction of Landsat 8 imagery derived indicators along with secondary information of Cuenca for 2014 and 2015. Eight indicators were obtained – normalized difference vegetation index (NDVI), leaf water content index (LWCI), normalized difference soil index (NSI), soil adjust vegetation transformed index (TSAVI), surface temperature (TS), nitrogen dioxide and ozone concentrations, and noise levels – and synthesized in environmental quality indexes adjusted to hexagonal cells, generated with two methodologies: spatial multiple criteria analysis and principal components analysis. This last technic was selected as the most suitable to represent the city, clustering thriving environmental quality in areas with high humidity and vegetation indexes, as well as low surface temperatures, and minor atmospheric pollution; and in degraded regions with heat island effect, high nitrogen dioxide concentrations, bare soil and low humidity, and larger constructed areas, that require priority intervention from the urban environmental planning entities.

Key words: Remote sensing, environmental quality index, atmospheric pollutants, multiple criteria analysis, principal components analysis, vegetation index.



Contenido

Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	12
1.1. Justificación.....	12
1.2. Objetivos	13
2. Revisión de literatura	14
2.1. Calidad ambiental urbana y su medición	14
2.2. Indicadores de calidad ambiental urbana	16
2.3. Índices de calidad ambiental	21
3. Materiales y Métodos.....	25
3.1. Área de estudio	27
3.2. Modelo Conceptual del Índice de Calidad Ambiental	28
3.3. Datos de base	30
3.4 Obtención de indicadores ambientales.....	32
3.5 Construcción de índice compuesto.....	37
3.6 Exploración Espacial y Temporal.....	42
4. Resultados y Discusión.....	43
4.1 Análisis de indicadores de espacios verdes, ruido y calidad del aire	43
4.2 Análisis de los índices de calidad ambiental urbanos generados a partir de métodos estadísticos multivariados	59
4.3 Comparación entre índices de calidad ambiental urbanos generados	69
5. Conclusiones	73
6. Recomendaciones	75
7. Referencias	76
8. Anexos	83



Figuras

Figura 1: Esquema general de la metodología para la obtención del Índice de Calidad Ambiental	26
Figura 2: El área de estudio consiste en el área urbana de la ciudad de Cuenca (Ecuador)	28
Figura 3: Sub-red pasiva de monitoreo de calidad del aire de la EMOV-EP, Cuenca	31
Figura 4: Estaciones de monitoreo de ruido en la ciudad de Cuenca	32
Figura 5: Sitios de interés y su ubicación dentro de las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca.....	45
Figura 6: Comparación de NDVI para las distintas fechas de estudio.....	49
Figura 7: Comparación de TSAVI para las distintas fechas de estudio.....	50
Figura 8: Comparación de LWCI para las distintas fechas de estudio	51
Figura 9: Comparación de NSI para las distintas fechas de estudio	52
Figura 10: Comparación de Temperatura del Suelo para las distintas fechas de estudio	53
Figura 11: Comparación de dióxido de nitrógeno para las distintas fechas de estudio	54
Figura 12: Comparación de ozono para las distintas fechas de estudio	55
Figura 13: Comparación de ruido para las distintas fechas de estudio	56
Figura 14: Representación espacial de ICAMC para las distintas fechas de estudio	62
Figura 15: Representación espacial de ICACP para las distintas fechas de estudio.....	68
Figura 16: Comparación cuantitativa de la calidad ambiental de cada celda de la malla hexagonal. a) ICACP b) ICAMC	70
Figura 17: Comparación de promedios por categoría de ICA para cada índice generado	71



Tablas

Tabla 1: Límites permisibles según la OMS sobre los niveles de ruido.....	20
Tabla 2. Límites permisibles según el TULAS para los niveles de ruido.	21
Tabla 3: Imágenes satelitales Landsat 8 utilizadas para generar los indicadores de vegetación, suelo y temperatura.....	30
Tabla 4. Recategorización de índice TSAVI	39
Tabla 5: Recategorización de índice NSI.....	39
Tabla 6: Recategorización de temperatura del suelo	39
Tabla 7: Recategorización de concentraciones de NO_2	40
Tabla 8: Recategorización de concentraciones de ozono.....	40
Tabla 9: Recategorización de niveles de ruido	41
Tabla 10: Escala Cualitativa para ICA a partir de ACP	42
Tabla 11: Matriz de correlaciones por indicador para las distintas fechas de estudio	44
Tabla 12: Matriz de correlación por fecha de estudio para los distintos indicadores	58
Tabla 13: Matriz de correlación de ICA_{MC} para las distintas fechas de estudio	60
Tabla 14: ANOVA de valores de ICA_{MC} para las distintas fechas de estudio	60
Tabla 15: Resultados del ACP para las cuatro imágenes satelitales analizadas	65
Tabla 16: Matriz de correlación de ICA_{CP} para las distintas fechas de estudio	66
Tabla 17: ANOVA de calificaciones de ICA_{CP} para las distintas fechas de estudio.....	66
Tabla 18: Matriz de correlación entre índices de calidad ambiental para cada fecha de estudio	69



Anexos

Anexo 1: Estaciones de monitoreo de calidad del aire (NO_2 y O_3)	83
Anexo 2: Registro de concentraciones de NO_2 y O_3 para los años 2014 y 2015.....	84
Anexo 3: Puntos de monitoreo de ruido.....	86
Anexo 4: Registros de ruido para los años 2014 y 2015.....	87
Anexo 5: Valores extraídos para la banda RED y NIR para la determinación del índice TSAVI	88
Anexo 6: Valores extraídos de las bandas NIR y SWIR para definir valores NIR_{FT} y SWIR_{FT}	89
Anexo 7: Indicadores de estudio reclasificados	90
Anexo 8: Diagramas de caja para los indicadores generados	96
Anexo 9: Análisis de outliers para la imagen del 2 de noviembre de 2015	97
Anexo 10: Diagramas de sedimentación y de dispersión bi-espaciales del ACP para cada fecha de estudio.....	99



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Luis Miguel Sánchez Vega, autor de la tesis “Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), enfocado al sector urbano de la ciudad de Cuenca utilizando teledetección y análisis espacial”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Mayo del 2017

Luis Miguel Sánchez Vega

C.I: 0105256036



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis Miguel Sánchez Vega, autor de la tesis “Elaboración de un índice de calidad ambiental (ICA), enfocado al sector urbano de la ciudad de Cuenca utilizando teledetección y análisis espacial”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Agrónomo. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Mayo del 2017

Luis Miguel Sánchez Vega

C.I: 0105256036



Dedicatoria

Dedico de manera especial a mis padres Luis Sánchez y María Vega, que han sido los pilares de mi formación como persona, juntos me han inculcado valores indispensables para la vida, gracias a su confianza, apoyo, comprensión, a sus consejos, he logrado culminar una meta más en mi vida.

A mis abuelitos, tíos y hermanas, quienes han colaborado para superarme en el ámbito personal y profesional.

Luis Miguel.



Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por colmarme de bendiciones en el trayecto de mi vida, a las autoridades de la Universidad de Cuenca y Escuela de Ingeniería Agronómica por darme la oportunidad de formarme y desarrollarme como profesional dentro de esta honorable Institución.

A mi director de tesis Ph.D Daniel Orellana, quien me ha permitido llevar a cabo el presente trabajo y por el apoyo que me ha brindado a través de sus conocimientos.

A mis familiares y amigos quienes han sido base fundamental de mi educación y que han reforzado mi formación como persona, mediante su apoyo incondicional, infinitamente gracias.

Luis Miguel.

1. Introducción

La pérdida de calidad ambiental urbana se ha convertido en uno de los problemas más apremiantes de las ciudades del siglo XXI. Actualmente se busca reducir los efectos de este proceso de degradación y entender el comportamiento de los factores causales, tales como la contaminación atmosférica, generación y propagación del ruido, pérdida de vegetación, entre otros, mediante técnicas de teledetección y sensores *in situ*, que permitan identificar su distribución geográfica y proveer conocimiento para la generación de estrategias de gestión ambiental para las zonas afectadas (Alvarez y Padilla, 2014).

Estas técnicas han facilitado el trabajo para generar una amplia y aceptada gama de indicadores ambientales, que cumplen un papel importante como herramientas básicas de información para la elaboración de informes sobre el estado del medioambiente (Aguirre, 2009), resultando en índices que pasan a formar parte de la construcción de políticas públicas para abarcar problemas emergentes de interés social, económico y ambiental (Santana et al., 2010). Es importante desarrollar metodologías con mayores niveles de especificidad espacial, dado que las concentraciones urbanas son sistemas complejos en donde las situaciones ambientales (positivas y negativas) pueden presentar diferencias significativas entre zonas de una misma ciudad (Leva, 2005). Es necesario, por lo tanto, crear modelos espaciales de información sistematizada que permitan a los tomadores de decisiones diseñar y priorizar la ejecución de estrategias ambientales que impacten de forma diferencial las distintas zonas de las ciudades.

1.1. Justificación

El monitoreo ambiental en las ciudades de los países más desarrollados está fuertemente basado en mediciones *in situ* a través de tecnología de alta precisión y elevado costo. Sin embargo, muchas ciudades pequeñas e intermedias de América Latina y otras partes del mundo no cuentan con información sobre el comportamiento espacio-temporal de los factores que inciden en la calidad ambiental que permita implementar programas de gestión ambiental (Santana et al., 2010). La ciudad de Cuenca (Ecuador), considerada como una ciudad intermedia emergente por el Banco Interamericano de Desarrollo BID, enfrenta crecientes problemas ambientales relacionados con el incremento explosivo de tráfico motorizado, con la ubicación de actividades industriales cercanas a la ciudad, y con la degradación de las zonas agrícolas y de protección ambiental cercanas a la urbe. Esta situación requiere información sobre los patrones espaciales y temporales del deterioro ambiental que permita a los tomadores de decisiones generar políticas de gestión ambiental

relacionadas con el uso del suelo, la movilidad, la industria y el ruido y monitorear a su vez los impactos de dichas políticas.

La preocupación actual sobre la calidad ambiental de la ciudad es notoria, principalmente en lo relacionado con la contaminación del aire, pues tanto instituciones públicas como organismos académicos cuentan con programas de medición y monitoreo de contaminantes atmosféricos y de niveles de presión sonora. Aunque estos programas han demostrado su utilidad, existen aún aspectos menos estudiados, relacionados sobre todo con la vegetación urbana y la temperatura de la superficie. Por otro lado, se conoce poco sobre la interacción entre estos factores en el tiempo y el espacio. Frente a esta carencia, existe la alternativa de utilizar metodologías basadas en sensores remotos, principalmente de imágenes satelitales, que permitan obtener datos de forma ágil y a costos bajos y realizar análisis espacial y temporal del comportamiento de los factores ambientales. Existen múltiples aplicaciones de teledetección para coleccionar datos sobre aspectos ambientales, que han demostrado su utilidad en ambientes urbanos. Sin embargo, pocas investigaciones han abordado la integración de distintos indicadores desarrollados a partir de imágenes satelitales y sensores *in situ* en ciudades intermedias o pequeñas de América Latina para crear índices sintéticos que expliquen la complejidad espacial de la calidad ambiental urbana (Borderías y Marín, 2006).

La presente investigación busca estudiar los patrones espaciales de calidad ambiental de la zona urbana de la ciudad de Cuenca, empleando ocho indicadores elaborados con información de imágenes satelitales y sensores *in situ*. Por otro lado, propone la construcción de un índice compuesto de calidad ambiental, que pueda ser utilizado por las entidades encargadas de la gestión ambiental de la ciudad y que sirva como línea base para programas de monitoreo a largo plazo. La investigación está basada en la metodología propuesta por Santana et al. (2010) la cual fue adaptada para incluir nuevos indicadores provenientes de interpolación de datos de sensores *in situ*, para explorar diferentes formas de construir el índice compuesto, y para explorar formas más adecuadas de discretizar el espacio en unidades de análisis.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Explorar los patrones espaciales de calidad ambiental de la ciudad de Cuenca utilizando un Índice de Calidad Ambiental urbano (ICA) elaborado a partir de imágenes satelitales y sensores *in situ*.

1.2.2. Objetivos específicos

- OE1. Generar y comparar indicadores de cobertura del suelo a partir de imágenes satelitales LANDSAT 8 e indicadores de ruido y contaminación a partir de sensores *in situ*.
- OE2. Construir un Índice de Calidad Ambiental a partir de los componentes de cobertura del suelo, ruido y calidad del aire utilizando métodos estadísticos multivariados.
- OE3. Detectar y estudiar patrones espaciales y temporales del Índice de Calidad Ambiental en la ciudad de Cuenca para los años 2014 y 2015.

2. Revisión de literatura

2.1. Calidad ambiental urbana y su medición

En las últimas cinco décadas, las ciudades latinoamericanas han sido sometidas a procesos de urbanización incontrolados que han alterado el espacio urbano (Martínez, 2002), lo cual afecta los procesos de intercambio de energía entre la superficie de la tierra y la atmósfera, el sistema hidrológico superficial y subsuperficial, la calidad del aire y agua, y las condiciones meso y micro climáticas (Wilson et al., 2003). Todos estos procesos afectan directamente al desarrollo social, económico y ambiental de una urbe, por lo que es urgente que los tomadores de decisiones enfrenten este problema dando soluciones integrales para el desarrollo de una sociedad sostenible. No obstante para iniciar este proceso es imprescindible identificar las causas de estos problemas, para lo cual se requiere un diagnóstico ambiental.

La calidad ambiental urbana abarca un conjunto complejo de factores humanos y ambientales interrelacionados, tales como densidad poblacional, disposición de las construcciones, áreas verdes, calidad del aire, entre otros, que influyen positiva o negativamente en la vida de los ciudadanos (Nichol y Wong, 2005). La valoración y evaluación de la calidad ambiental suele estar basada en la construcción, medición y monitoreo de indicadores ambientales. Estos indicadores son mediciones científicas de la trayectoria de las condiciones ambientales a través del tiempo, incluyendo el estado del aire, agua y suelo, la presión sobre ellos y los efectos resultantes sobre la salud ecológica y humana (EPA, 2002). La organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico define un indicador como “el parámetro o el valor resultante de un conjunto de parámetros, que ofrece información sobre un fenómeno, con un significado dado por una definición clara de su función” (OECD, 1993).

Tradicionalmente, las metodologías para valorar la calidad ambiental de la ciudad eran costosas y respondían a necesidades específicas de proyectos puntuales, siendo muy pocas las que gozaban de una aplicación sistemática. Dichas metodologías podrían clasificarse en

modelos de identificación (listas de verificación causa-efecto en el ambiente, cuestionarios, matrices causa-efecto, diagramas de flujo, etc.), *modelos de previsión* complementados con pruebas experimentales y ensayos “*in situ*”, con el fin de predecir las alteraciones en magnitud, y *modelos de evaluación* que consisten en el cálculo de evaluación neta y global costo/beneficio del impacto ambiental (Sanz, 1991). Los avances tecnológicos han permitido que las metodologías tradicionales sean paulatinamente reemplazadas o complementadas en diversa medida con técnicas basadas en teledetección y otros tipos de sensores remotos y sensores *in situ*, modelos de análisis espacial y cartografía computarizada. Estas técnicas presentan ventajas en lo referente a costos, menor tiempo invertido en la recolección de datos, información más precisa, mayor facilidad en la interpretación y predicción de fenómenos ambientales, además de ser un aporte importante para las instituciones encargadas de la toma de decisiones, ya que permite analizar el entorno de forma local o global (Chuvieco, 2007).

Los sensores remotos y de forma particular los satélites de observación de la superficie terrestre, recogen información latente relacionada con la superficie terrestre, la atmosfera y de los procesos de intercambio de energía. Las imágenes satelitales son una herramienta útil para entender y monitorear los procesos urbanos relacionados con el espacio físico, permitiendo construir bases de datos sobre el ambiente urbano (Weng, 2001). Estas imágenes contienen información sobre la superficie de la Tierra de forma continua en el espacio y con cierta frecuencia de tiempo, en distintas zonas del espectro electromagnético y a diferentes escalas permitiendo una mejor comprensión de varios fenómenos ambientales (Prihodko y Goward, 1997). Según Romero y Vásquez, (2005) el uso de técnicas de análisis de imágenes satelitales ha contribuido en la obtención de una gran gama de indicadores que contribuyen a la elaboración de índices ambientales para evaluar la calidad ambiental y de vida del entorno urbano. Entre estos índices se encuentran por ejemplo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Suelo Normalizado (NSI) y la temperatura de superficie (TS), los cuales permiten evaluar y monitorear la relación entre el espacio verde y el espacio construido así como de construcciones urbanísticas y la disminución de zonas con vegetación, que por ende alteran la calidad ambiental.

En la actualidad, entre los programas más exitosos de satélites de observación de la tierra, se encuentran los de la serie Landsat, cuyo último satélite Landsat-8, fue puesto en órbita en 2013. Éste presenta mayor calidad en sus capturas en lo referente a resolución espectral y espacial, además de que incorpora nuevas bandas espectrales, en comparación a sus predecesores (Knight y Kvaran, 2014). Una de las claves del éxito de Landsat es que los datos

son de acceso libre y global, además de presentar un balance interesante entre la resolución espacial, espectral y temporal (Satellite Imaging Corporation, 2015).

Adicionalmente a los sensores remotos, los nuevos sensores *in situ* permiten obtener información de parámetros ambientales con diferentes resoluciones espaciales y temporales. Por ejemplo, la medición de la calidad del aire requiere de sensores capaces de medir la variación espacial y temporal de distintos tipos de contaminantes. De la misma manera, el monitoreo del ruido requiere una estrategia de medición que atienda a la alta variabilidad espacial y temporal de este fenómeno.

2.2. Indicadores de calidad ambiental urbana

Para medir y monitorear la calidad ambiental urbana se han propuesto un sinnúmero de indicadores, entre los que se encuentran los relacionados con la biodiversidad, la vegetación, y las áreas verdes, el suelo, el clima y los contaminantes del agua y del aire, además de indicadores económicos, sociales y demográficos, entre otros. Debido a la enorme heterogeneidad de las ciudades y asentamientos urbanos, no existe un consenso amplio sobre los indicadores más apropiados para cada tema. Sin embargo, existen indicadores que son ampliamente utilizados debido a su facilidad de medición o estimación, la posibilidad de monitoreo en el tiempo, su potencial para comparar ciudades muy diferentes y su valor informativo sobre un tema en particular. A continuación se mencionan algunos de estos indicadores para los temas más relevantes de la presente investigación.

2.2.1. Áreas verdes

La vegetación cumple un papel importante en la conformación y calidad ambiental de los espacios abiertos, pues humifica y purifica el ambiente. Calles y avenidas sin árboles plantados en sus parterres presentan cuatro veces más polvo que aquellas calles arboladas, que además contienen una mayor riqueza y abundancia de aves en una ciudad, considerando inclusive que el oxígeno necesario para diez personas se genera a partir de 150 m² de hojas o 15 m² de césped (Díaz, 2005). Otra función importante de la vegetación es la amortiguación de la propagación del sonido y la canalización del viento, recurso muy benéfico para mejorar la calidad ambiental y el confort de los habitantes en el entorno urbano.

Las áreas verdes mitigan también los impactos térmicos al interior de las ciudades. Estudios realizados en la ciudad de Vancouver encontraron que las áreas boscosas son hasta 5.5 °C más frías que las urbanas, mientras que los parques urbanos verdes son 1.1 °C más fríos que las áreas edificadas (Wong, 2005). Dada la importancia de las áreas verdes para la calidad

de vida de la población urbana, la Organización Mundial de la Salud recomienda un estándar de 9 m²/habitante (OMS, 2005).

Existen varias formas de medir la vegetación urbana a partir de análisis de imágenes satélite, todas ellas basadas en la medición comparativa de la reflectividad de la superficie en las regiones del espectro electromagnético correspondientes al infrarrojo y al visible. Entre los índices más utilizados para medir esta variable se encuentran: El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Transformado (TSAVI). Por otro lado, el Índice de Humedad en las Hojas (LWCI) aporta también información valiosa respecto al área verde en la superficie urbana. Algunos de estos índices han sido utilizados para medir la calidad ambiental urbana (Santana et al., 2010).

2.2.2. Suelo edificado

Según Wiseman (2007), los indicadores de suelo urbano proveen información sobre las superficies construidas y permiten comprender los procesos de alteración del suelo debido a la expansión de las áreas industriales y residenciales. De la misma manera que con la vegetación, es posible obtener índices de suelo urbano a partir de imágenes de satélite. Entre los más conocidos, se encuentra el índice de suelo normalizado (NSI). Este tipo de índices permite estudiar los procesos de cambio de uso del suelo en el espacio y el tiempo, ayudando a comprender los patrones de crecimiento y expansión urbana y mejorar la planificación de las áreas periurbanas. Aunque sin duda existen otras importantes variables relacionadas con la calidad ambiental del suelo, tales como la captación y almacenamiento de carbono, la capacidad de infiltración hídrica y la contaminación por acción antrópica, (Biasioli et al., 2007; Lombi et al., 2001), éstas son menos susceptibles de ser estudiadas mediante técnicas de teledetección.

2.2.3. Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie terrestre está relacionada con la temperatura del aire, y en las zonas urbanas densamente construidas la temperatura del aire es mayor que la de los alrededores de la ciudad. Este fenómeno se conoce como “isla de calor urbana” y entre los factores de mayor influencia se encuentran la geometría urbana, el calor antropogénico y las propiedades térmicas de materiales de construcción (Ángel et al., 2010).

Las características ópticas de los materiales usados para la construcción del entorno urbano, especialmente el albedo solar y la emisividad infrarroja tienen un impacto importante en el balance termo energético de las ciudades. En los últimos años se ha estudiado el comportamiento térmico-ambiental de diferentes materiales usados para la construcción a fin

de caracterizar su impacto sobre la temperatura urbana. Dentro de este contexto, las calzadas vehiculares constituyen en promedio aproximadamente un 16% del suelo urbano, por lo tanto son un componente de gran relevancia debido a su incidencia en las características térmicas de las ciudades (Gómez y Castañeda, 2013).

Un término que se puede vincular directamente con la temperatura de la superficie es el confort térmico. Este es un factor que indica la conformidad de una persona con su ambiente térmico, es decir un estado en el que no se sienta ni demasiado calor, ni demasiado frío. Este se convierte por tanto en uno de los principales elementos al tomar en cuenta al momento de realizar actividades al aire libre (Guzmán y Ochoa, 2014), por lo cual se lo puede relacionar con el índice de calidad ambiental.

2.2.4. Contaminantes atmosféricos

La calidad del aire en la mayoría de ciudades se ha visto deteriorada debido al creciente ritmo de las actividades contaminantes, principalmente las emisiones procedentes del tráfico vehicular y la actividad industrial (Thomas y Osseiran, 2014), con graves consecuencias en la salud de las personas. La OMS indica que para el año 2012, alrededor de 7 millones de personas a nivel mundial fallecieron prematuramente debido a exposición a contaminación ambiental. Entre las causas de muerte por exposición a contaminación ambiental externa se encuentran cardiopatías isquémicas (40%), derrames (40%), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (11%), cáncer de pulmón (6%) e infección respiratoria aguda baja (3%) en niños (Jasarevic et al., 2014). Es por esto que la calidad del aire se encuentra entre las principales preocupaciones ambientales de los habitantes y las autoridades, frente a lo cual muchas ciudades han implementado programas de monitoreo a través de sensores *in situ* fijos y móviles que recojen datos sobre la concentración de los principales contaminantes, entre los que se encuentran el Monóxido de Carbono, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre, Ozono, Material Particulado de 2.5μ y 10μ . En este estudio se han seleccionado dos contaminantes como indicadores de la calidad del aire: Ozono y Dióxido de Nitrógeno, aunque metodológicamente es posible incorporar datos de otros contaminantes. Se seleccionan estos contaminantes al ser representantes de la amplia gama de gases nocivos que se emiten al ambiente. El dióxido de nitrógeno se selecciona como indicador de los contaminantes primarios (emisión directa de la fuente), mientras que el ozono se selecciona para representar los contaminantes secundarios (generados a partir de reacciones en la atmósfera), de manera que se considera una cantidad manejable de indicadores dentro de la construcción del índice de calidad ambiental.

Ozono

Inicialmente es importante realizar una distinción entre el ozono estratosférico y el ozono troposférico. El ozono estratosférico, conocido como la capa de ozono, absorbe la radiación ultravioleta (UV) proveniente del sol la cual genera fotólisis de oxígeno molecular y, se remueve por procesos dinámicos y químicos. Sus reacciones con compuestos clorados y bromados provenientes de emisiones antropogénicas, han provocado una disminución de esta capa, desencadenando efectos nocivos para el planeta, al incrementar la exposición a radiaciones UV. Desde el 2006, se ha comprobado que la capa de ozono se está recuperando tras la disminución de las emisiones previamente mencionadas (Vigouroux et al., 2008).

El Ozono troposférico (O_3) por su parte, es un gas incoloro, de olor penetrante, más denso que el aire y se origina a partir de la oxidación fotoquímica de monóxido de carbono, metano y compuestos orgánicos volátiles en la presencia de óxidos de nitrógeno. Es muy abundante en las zonas urbanas aunque sus efectos se expanden hacia las zonas rurales debido a la acción del viento. Es un contaminante de efecto invernadero nocivo que provoca una grave irritación, enfermedades pulmonares, fatiga, falta de coordinación en las personas, además corroe metales y produce manchas en las plantas (Borderías y Marín, 2006).

La norma internacional de la Organización Mundial de la Salud establece que la máxima concentración de ozono, obtenida mediante muestra continua en un periodo de una hora, no deberá exceder de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ más de una vez al año, y la máxima concentración en un periodo de ocho horas, no deberá exceder de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, más de una vez al año (OMS, 2016). Los mismos límites máximos permisibles se aplican en la normativa ecuatoriana (Ministerio del Ambiente, 2004).

Dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un agente gaseoso sumamente oxidante y reactivo, soluble en agua, que se forma como subproducto en la combustión en altas temperaturas, como en motores de vehículos, plantas industriales, gasolina, diésel y otros combustibles (Brunekreef y Holgate, 2002). Los óxidos de nitrógeno se generan también de forma natural por actividad bacteriana, volcánica, descargas eléctricas atmosféricas, sin embargo la cantidad generada es baja en comparación con las emisiones de origen antropogénico, lo que causa el smog y lo que conlleva a enfermedades respiratorias en la población.

Según la OMS (2016), el promedio aritmético de la concentración de NO_2 y determinada en todas las muestras en un año, no deberá exceder de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la concentración máxima en una hora no deberá exceder de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ más de dos veces al año. Los valores de concentración de contaminantes comunes del aire, establecidos en esta norma, así como los

que están determinados en los programas públicos de medición, están sujetos a las condiciones de referencia de 25°C y 760mm Hg.

En el caso de la normativa ecuatoriana, el promedio aritmético de la concentración de óxidos de nitrógeno, expresados como NO₂, y determinados en todas las muestras en un año, no deberá exceder de 100 µg/m³. La concentración máxima en 24 horas no deberá exceder 150 µg/m³ más de dos veces en un año, según el Libro VI Anexo 4 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) (Ministerio del Ambiente, 2004).

2.2.5. Contaminación acústica

La contaminación acústica se refiere a la presencia de ruidos o vibraciones que impliquen molestia, riesgo, o daño a las personas y el ambiente, repercutiendo en el grado de confort y calidad de vida. Los vehículos motorizados son la causa de alrededor del 70% (Platzer et al. 2007) de las emisiones sonoras seguido por la industria, el comercio y el turismo, entre otros. Los niveles de ruido se miden según su intensidad y nivel de presión sonora, siendo su unidad de medida el decibelio (dB)(OSHA, 1996).

Según la OMS (2015), se recomienda que el nivel más alto permisible de exposición al ruido en el lugar de trabajo no sea mayor a 85 dB durante un máximo de 8 horas al día, por lo tanto se ha establecido una escala de ruido medido en decibelios conforme al oído humano (Tabla 1).

Tabla 1: Límites permisibles según la OMS sobre los niveles de ruido.

dB de Presión Sonora	Nivel de Ruido
0	Nivel mínimo de audición
10-50	Nivel de ruido bajo
55-65	Nivel de confort acústico
65- 75	Ruido molesto equivalente a una calle con tráfico
75-100	Inicio de daños en el oído
100-120	Riesgo de sordera
120-140	Umbral de dolor acústico

Fuente: (OMS, 2015)

En el caso de la norma ecuatoriana, el Libro VI (Anexo 5) del TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2004) considera seis zonas según uso del suelo para el establecimiento de límites permisibles de contaminación sonora (Tabla 2).

Tabla 2. Límites permisibles según el TULAS para los niveles de ruido.

dB de presión sonora	Uso de suelo
45	Zona hospitalaria y educativa
50	Zona residencial
55	Zona residencial mixta
60	Zona comercial
65	Zona comercial mixta
70	Zona industrial

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012)

2.3. Índices de calidad ambiental

De acuerdo a Pender et al. (2000), los índices son una herramienta cuantitativa que simplifica a través de modelos matemáticos los atributos y pesos de múltiples variables, con la intención de proporcionar una explicación más amplia de un recurso o el atributo a evaluar y gestionar.

Un índice de calidad ambiental es el resultado de la fusión de un conjunto de indicadores ambientales, para brindar información sistematizada de fenómenos que ocurren en un espacio geográfico, con una percepción que se asemeja a la realidad. La selección de indicadores ha estado condicionada en gran medida por la disponibilidad en la base de datos de información suficiente y adecuada para su construcción (Leva, 2005). Es importante enfatizar que la selección del conjunto de indicadores que componen un índice no es una tarea trivial, dado que ello demanda el entendimiento de cómo funciona el sistema o fenómeno que se quiere explicar, y esto no siempre es posible cuando se trabaja con el medio ambiente (European Environmental Agency, 2002). En este sentido, la construcción de un índice de calidad ambiental urbana puede variar enormemente en complejidad en función de criterios de disponibilidad de información, factibilidad de monitoreo, cobertura espacio-temporal, capacidad de representación y predicción, entre otros.

Por otro lado, es necesario reconocer la heterogeneidad espacial de las ciudades, pues la calidad ambiental varía de un lugar a otro dentro de una misma ciudad. Por ejemplo, en un estudio realizado en Santiago (Chile), Escobedo y Nowak (2009) encontraron que la concentración de contaminantes atmosféricos estaba íntimamente relacionada con la distribución espacial de la vegetación. De la misma manera, la presión sonora en los ambientes urbanos tiene una alta variabilidad espacial; por ejemplo Doygun y Kuşat (2008)

encontraron que en Kahramanmaraş (Turquía) la presión sonora en las áreas comerciales y residenciales fue significativamente mayor que en otros tipos de uso del suelo. Finalmente, Nichol y Wong (2009) han mostrado a través de un estudio realizado en Hong Kong cómo la variabilidad espacial de la temperatura y la vegetación está influenciada por facores locales y factores regionales.

Por todo esto, es importante que los indicadores que componen un índice de calidad ambiental puedan ser representados espacialmente de manera que permitan expresar y analizar la heterogeneidad geográfica de la ciudad. Ya que algunas variables provienen de datos recolectados en localizaciones puntuales a través de sensores *in situ*, es necesario aplicar métodos de interpolación para crear superficies continuas de información. Según Murillo et al. (2012), el método de interpolación más apropiado para variables de ruido y contaminantes atmosféricos es el método de Kriging basado en la auto-correlación espacial de las variables. Kriging es un estimador local estadístico que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos, asumiendo que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias, aunque es posible implementar algunos procesos cuando estas condiciones no se cumplen. La auto-correlación espacial de cada variable se estudia utilizando un semivariograma obtenido a partir de un análisis exploratorio de los datos donde se establece el promedio de la varianza entre pares de puntos en función de la distancia y la dirección (Niño, 2008).

Existen diversas formas de fusionar la información contenida en cada indicador para componer un índice sintético. Velázquez y Celemín (2011) adoptaron una aproximación aritmética en la que los indicadores seleccionados se agrupan en dimensiones y se les asignan pesos o ponderaciones para formar el índice compuesto en un proceso similar al de Análisis Multi-Criterio. Ya que cada indicador se mide en escalas y unidades diferentes, es común transformarlos a una escala única, sin sacrificar la calidad, confiabilidad y consenso en los resultados Mendez (2003).

Uno de los problemas con el método basado en análisis multi-criterio es la potencial colinearidad entre variables de los diferentes indicadores. Por ejemplo, los indicadores de área verde pueden tener una correlación negativa con los de suelo y temperatura, más aún si se toma en cuenta la auto-correlación espacial característica de cualquier conjunto de datos geográficos (Smith et al., 2009). Estas características provocan redundancia de información en el índice sintético, ya que se podría estar inflando el peso en las dimensiones con variables correlacionadas. Por esta razón otro método consiste en utilizar Análisis de Componentes Principales (ACP) para reducir la dimensionalidad de la información contenida en los

indicadores (Nardo et al., 2005). El ACP permite realizar una reducción de dimensiones del conjunto de datos a trabajar, identificando un patrón de comportamiento entre los mismos y permitiendo una fácil interpretación de los componentes (Escobar, 2006). Además permite identificar variables significativas dentro del conjunto de datos, pero transformándolas de tal manera que los componentes principales resultantes no tengan una correlación entre sí como sucede con el conjunto original de datos. Esta falta de correlación asegura que los componentes miden dimensiones estadísticas distintas en el conjunto de datos (Nardo et al., 2005). El primer componente principal será el que explique la mayor cantidad de varianza de los datos, y los componentes siguientes explicarán la varianza restante.

Estudios anteriores han demostrado la aplicación de este método para crear un Índice de Calidad Ambiental a partir de información de imágenes satélite en Salford, Reino Unido (Gunawan et al., 2007). El mismo método ha sido utilizado por Santana et al. (2010) en Cali (Colombia) quienes propusieron un índice de calidad ambiental representado por el primer componente retenido en el análisis de componentes principales. Una de las desventajas de este método es que la interpretación del índice puede ser compleja dificultando su utilización para la toma de decisiones. Por otro lado, ya que el índice está basado en las propiedades estadísticas del conjunto de datos particular que se está analizando, no es posible una comparación directa entre diferentes casos o en diferentes fechas.

Cabe mencionar que en la ciudad de Cuenca, correspondiente al área de estudio de la presente investigación, se han realizado esfuerzos para generar índices de calidad ambiental urbanos. Por un lado, se encuentra el índice de calidad ambiental urbano de Cuenca (ICAUC), un índice propuesto por la Universidad del Azuay (UDA) en conjunto con la Comisión de Gestión Ambiental (CGA) que resume sus resultados en un informe preliminar publicado en la página de la CGA y que muestra sus resultados en el geoportal de la UDA¹ (Universidad de Azuay, 2009). Este índice contiene una base completa de indicadores provenientes de distintas fuentes de información de empresas públicas e instituciones de educación superior de la ciudad, agrupadas por: Bienestar Social, Ambiente Sano e Infraestructura Urbana Pública. Este índice contiene algunas de las variables tomadas en cuenta en este estudio (NDVI, O₃, NO₂, Ruido) incluyendo además parámetros de calidad del agua, vivienda, entre otros. El resultado se presenta por parroquia rural con una valoración del 0 al 1, concluyendo que las parroquias ubicadas en la periferia del centro histórico presenta la mejor calidad ambiental.

¹ <http://gis.uazuay.edu.ec/tematicos/ICAUC/>



Aún si este índice otorga una valoración ambiental al área de estudio por sectores, se mantiene un nivel de agregación espacial demasiado alto, evitando un análisis de fuentes de deterioro de calidad ambiental dentro de la parroquia analizada. La presente investigación facilita esta identificación al utilizar celdas hexagonales que permiten analizar el índice generado a una escala espacial menor.

Por otra parte se tiene el Índice General de Calidad Ambiental (IGCA) que mide la contaminación del aire en Cuenca, Ecuador como un esfuerzo del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) de la Universidad del Azuay en conjunto con la Empresa Pública de Movilidad (EMOV-EP) la cual publica sus resultados en línea a través de servicios estándares OGC (Open Geospatial Consortium)². La plataforma publica información referente a contaminantes atmosféricos de la ciudad reportados por la EMOV-EP (O_3 , CO , NO_2 , SO_2 y $PM_{2.5}$) y el IGCA. Este índice se obtiene a partir de la generación de un índice de calidad del aire para cada contaminante analizado de la estación del Municipio ubicada en el centro de la ciudad, seleccionando al IGCA como el elemento contaminante con el mayor valor de índice para representar a todos los contaminantes reportados. El ICA de cada contaminante se basa en el promedio en un periodo de tiempo determinado tras una homogenización, depuración y corrección a condiciones locales de los datos de la estación (Sellers, 2012).

La página se actualiza periódicamente según la información recopilada por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la EMOV-EP, presentando un beneficio para la ciudadanía al permitirle conocer la calidad del aire en la ciudad a tiempo real. Sin embargo, los datos generados son genrales para toda la ciudad, excluyendo un análisis sectorial de la calidad ambiental dentro de la misma.

² <http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/sistemagrafico.php>

3. Materiales y Métodos

La metodología para la presente investigación está compuesta de cinco fases. La primera fase consistió en definir el modelo conceptual del Índice de Calidad Ambiental (ICA), sus componentes y propiedades temáticas y espaciales. La segunda fase consistió en recolectar y pre-procesar los datos base para los indicadores individuales a partir de fuentes secundarias, imágenes satélite y sensores *in situ*. En la tercera fase se obtuvieron los indicadores individuales en forma de capas raster donde cada píxel representa el valor de cada indicador. En la cuarta fase se elaboraron dos versiones del Índice de Calidad Ambiental mediante dos métodos distintos. Finalmente, en la quinta fase se utilizó el ICA para explorar el comportamiento espacial y temporal de la calidad ambiental en cuatro períodos, correspondientes a Julio 2014, Octubre 2014, Julio 2015 y Noviembre 2015. Las fases 1 y 5 corresponden por lo tanto al Objetivo Específico 1, las fases 2 y 3 corresponden al Objetivo Específico 2 y la fase 4 corresponde al Objetivo Específico 3. En la Figura 1 se ilustra un esquema de la metodología empleada. En la siguientes subsecciones se presentarán detalles sobre la zona de estudio y se explicarán a profundidad cada una de las fases.

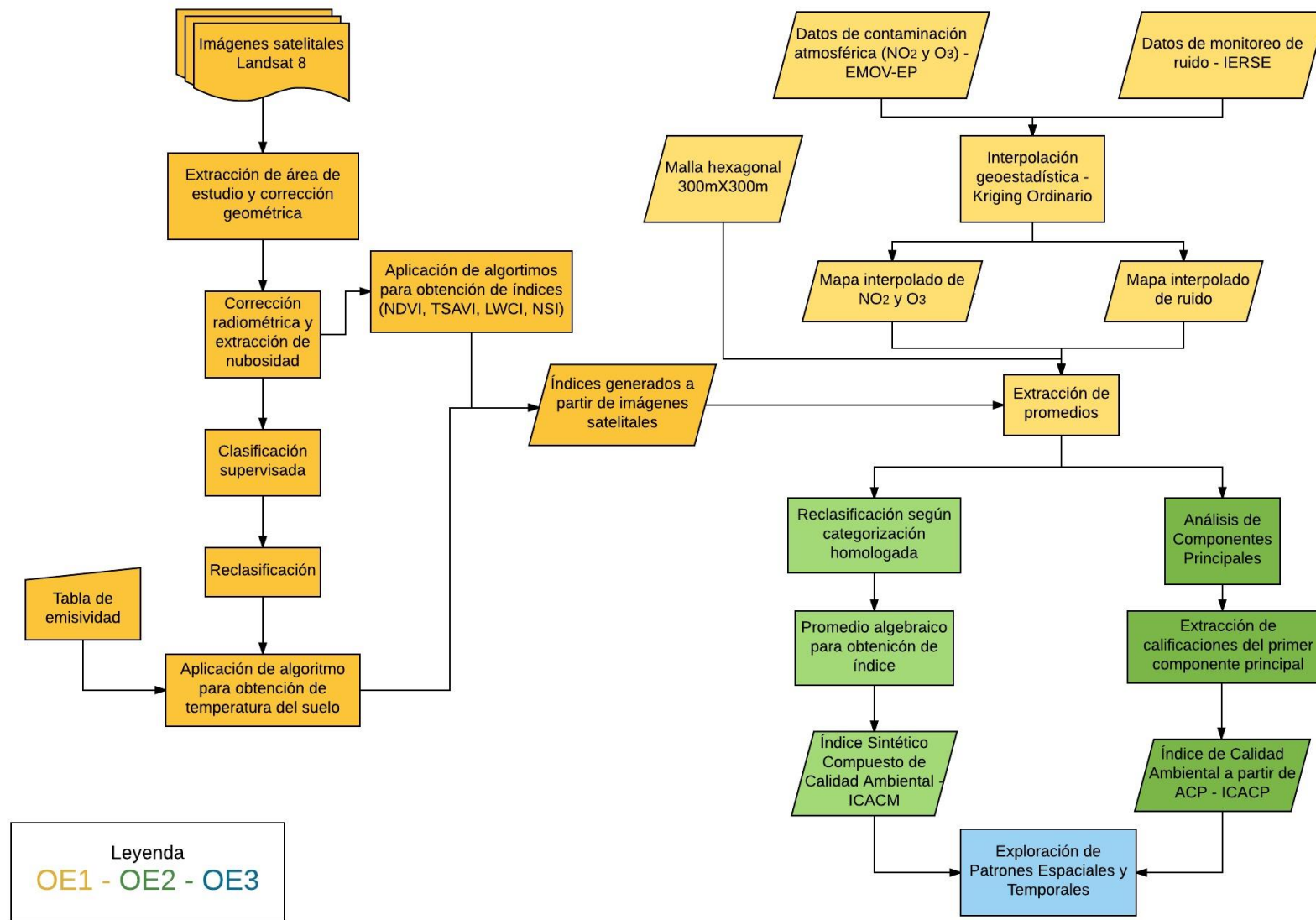


Figura 1: Esquema general de la metodología para la obtención del Índice de Calidad Ambiental

3.1. Área de estudio

La ciudad de Cuenca está ubicada al sur de la república del Ecuador, entre los 2°49' y 2°56' de latitud Sur y 79°04' y 78°53' de longitud Este (Figura 2). La altitud varía entre los 2 500 a 2 600 metros sobre el nivel del mar. El clima en la ciudad no es marcado, por lo que se puede considerar entre templado y cálido, con una precipitación anual promedio de 850 mm y temperatura promedio anual de 15°C (INAMHI, 2015).

En términos fisiográficos la ciudad se localiza en un valle interandino, está dividida en tres terrazas, tanto en la terraza alta como en la terraza baja encontramos un estilo urbanístico moderno que engloba amplias avenidas y áreas verdes, mientras que la terraza media está ocupada por el centro histórico. Cuenca esta limitada por el sector de Capulispamba al norte, por la parroquia Baños al sur, por la parroquia El Valle al este y por parroquia Sayausí al oeste. En estos últimos años la ciudad se ha expandido en todas las direcciones. La ciudad tiene una extensión urbana aproximada de 7800 hectáreas, con una población de 331000 habitantes (INEC, 2010).

Para analizar la variabilidad espacial de los indicadores se dividió la zona de estudio en 1097 celdas hexagonales de 7.8 hectáreas cada una. Se seleccionó una forma hexagonal para las celdas debido a que en comparación con las celdas cuadrangulares su geometría disminuye el efecto de borde, el contorno de cada celda es cercano a un valor equipotencial y todas las celdas vecinas comparten las mismas características de vecindad (Birch, Oom, y Beecham, 2007). Para analizar la variabilidad temporal se seleccionaron los años 2014 y 2015 para los cuales se cuenta con datos de todos los indicadores, adicionalmente, para los datos provenientes de sensores remotos se seleccionaron dos fechas por año con el fin de explorar la variabilidad entre época seca y época de lluvias.

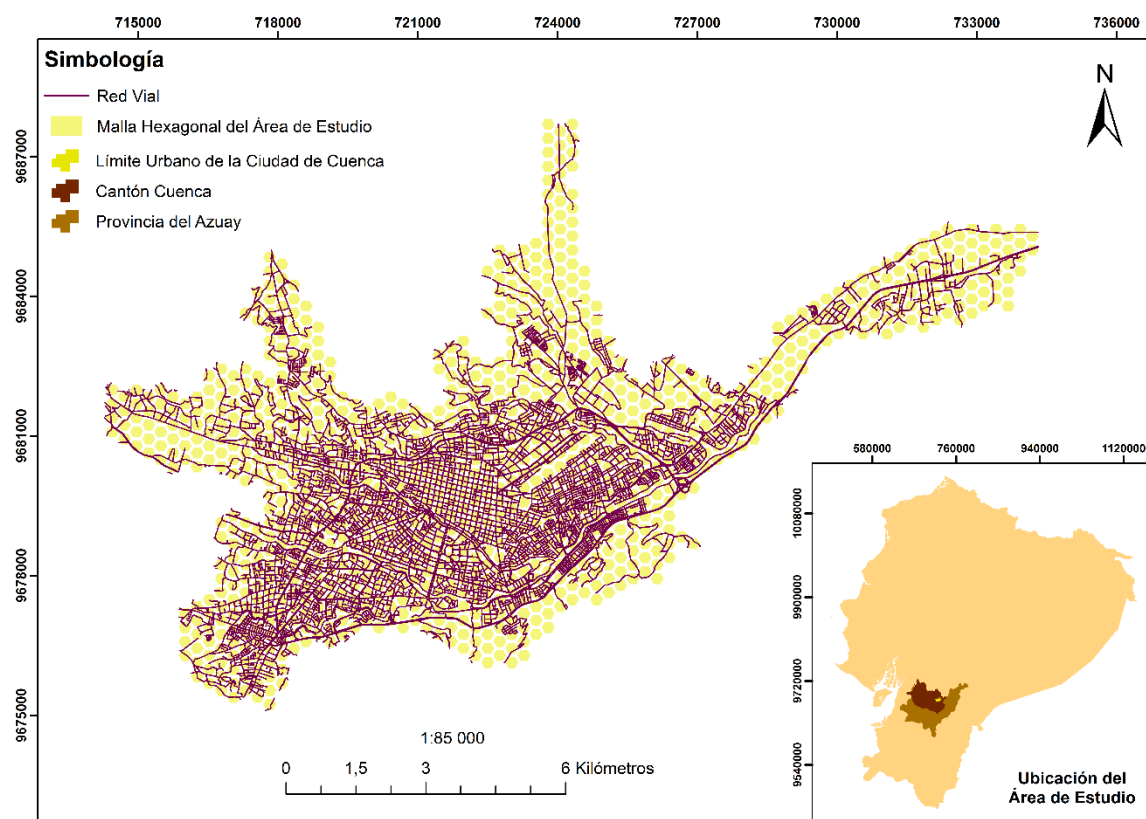


Figura 2: El área de estudio consiste en el área urbana de la ciudad de Cuenca (Ecuador)

3.2. Modelo Conceptual del Índice de Calidad Ambiental

La intención del Índice de Calidad Ambiental (ICA) es proveer de forma sintética, información sobre el estado general del ambiente en la ciudad. Por lo tanto, el ICA intenta resumir una gran cantidad de información en un valor sintético que permita realizar comparaciones espaciales y temporales. La creación de un índice compuesto implica por lo tanto la selección de un conjunto de indicadores que representen las diferentes variables y dimensiones que compondrán el fenómeno de estudio. Por otra parte, ya que esta investigación busca explorar patrones espaciales y temporales de la calidad ambiental en la ciudad, es imprescindible que los indicadores que componen el ICA cumplan con tres características clave: *Exhaustividad*, *Disponibilidad* y *Representatividad*. La *Exhaustividad* se refiere a que los datos para calcular el indicador cubran la totalidad del área de estudio, esto es, que en lo posible no existan zonas sin datos. La *Disponibilidad* se refiere a que los datos estén disponibles a partir de fuentes secundarias o de procesos de recolección que no impliquen altos costos económicos o logísticos. Finalmente, la *Representatividad* implica que el indicador sea representativo de la dimensión que se quiere estudiar y que permita estudiar la variación espacial y temporal de sus valores.

La selección de las dimensiones, variables e indicadores es por lo tanto una tarea de cierta complejidad y un alto grado de subjetividad. En la presente investigación se ha adoptado el principio de parsimonia para seleccionar los indicadores, de manera que el modelo conceptual del índice sea representativo de los aspectos ambientales más importantes del espacio urbano, pero que a la vez sea lo suficientemente sencillo para permitir estudiar la variabilidad espacio-temporal de calidad ambiental a partir de las fuentes disponibles.

Por lo tanto, tomando en cuenta las características mencionadas, el modelo conceptual propuesto para el ICA está compuesto por las siguientes dimensiones: *Vegetación*, *Suelo Construido*, *Ruido* y *Calidad del Aire*. Aunque es claro que otras dimensiones tales como el agua o los aspectos socioeconómicos son no menos importantes, en esta investigación se ha decidido no incluirlos debido a que no son exhaustivos o no tienen una disponibilidad espacial o temporal lo suficientemente detallada como para explorar sus patrones. Sin embargo, la metodología puede adaptarse para incluir en el futuro otras dimensiones.

Para estudiar la dimensión *Vegetación* se seleccionaron tres indicadores obtenidos a partir de imágenes satélite: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI) e Índice de Humedad en las Hojas (LWCI). Para la dimensión *Suelo Construido* los indicadores se obtienen también a partir de imágenes satélite y son: Índice suelos normalizado (NSI) y Temperatura de la Superficie (TS). En el caso de la dimensión *Ruido* se utilizó como indicador la presión sonora medida en estaciones de monitoreo puntuales e interpolada para obtener un mapa continuo. Finalmente, para la dimensión *Calidad del Aire*, se seleccionaron como indicadores las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Ozono (O_3) para los cuales se cuenta también con datos de mediciones puntuales que pueden ser interpolados.

Una vez seleccionados los indicadores, el ICA debe resumir la información en una escala única que permita sintetizar la información de todas las dimensiones. Una posibilidad es utilizar un análisis multi criterio que consiste en convertir cada indicador a una escala única que va desde 1 (*muy deficiente*) a 5 (*muy bueno*) atendiendo límites provenientes de normativas nacionales e internacionales aplicables de manera que se pueda realizar comparaciones entre distintos indicadores y realizar operaciones algebraicas con ellos para construir el índice sintético. Otra posibilidad es utilizar técnicas de reducción de dimensionalidad mediante Análisis de Componentes Principales, método que ya ha sido aplicado en investigaciones previas (Santana et al., 2010). En esta investigación, se utilizan las dos técnicas para implementar el modelo conceptual del Índice de Calidad Ambiental.

3.3. Datos de base

3.3.1. Datos de sensores remotos

Para la obtención de indicadores relacionados con la vegetación, suelo y temperatura superficial, se utilizaron cuatro imágenes del satélite Landsat 8³, en el *path (trayectoria)* 10 y *row (fila)* 62 correspondientes al área de estudio. Las fechas y códigos de las imágenes seleccionadas se enlistan en la Tabla 3. Este satélite presenta once bandas, de las cuales se descargan diez, correspondientes a las siete bandas multiespectrales (1-7) con resolución espacial de 30 metros; dos bandas térmicas (10-11) con resolución espacial de 100 metros (reescalada a 30 metros) y la banda pancromática (8) con resolución espacial de 15 metros.

El pre-procesamiento digital de las imágenes comprendió la eliminación de nubosidad en caso de ser necesario y la conversión de niveles digitales (ND) a valores de reflectividad para bandas multiespectrales y a valores de temperatura de brillo para bandas térmicas. Ya que la imagen del 26 de julio de 2014 presentaba alta cobertura de nubes fue necesario realizar una máscara de extracción basada en la banda de evaluación de calidad (Quality Assessment - QA). Todos los procesos fueron realizados en el software QGIS⁴ con el complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (Congedo y Munafò, 2012).

Tabla 3: Imágenes satelitales Landsat 8 utilizadas para generar los indicadores de vegetación, suelo y temperatura.

Código	Fecha
LC80100622014207LGN00	26/07/2014
LC80100622014303LGN00	30/10/2014
LC80100622015194LGN00	13/07/2015
LC80100622015306LGN00	02/11/2015

3.3.2. Datos de sensores *in situ*

Los indicadores de contaminación atmosférica y ruido fueron calculados a partir de información de sensores *in situ* de provenientes de fuentes de información pública y de grupos de investigación de institutos de educación superior.

Los datos de calidad del aire fueron obtenidos de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca de la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte, EMOV-EP,

³ Descargadas de: <http://libra.developmentseed.org/>

⁴ QGIS versión 2.8.1: <http://qgis.org>.

activa desde el año 2010 (Figura 3), la cual cuenta con una sub-red pasiva de monitoreo de calidad del aire distribuida en 19 puntos de la ciudad (Anexo 1) con una cobertura radial de 2 km dentro del perímetro urbano para cada sensor (Alcaldía de Cuenca y Red de Monitoreo EMOV EP., 2014). La base de datos utilizada (Anexo 2) corresponde al año 2014 y 2015 seleccionando el dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3), por su impacto como contaminantes en la atmósfera. Otros indicadores, como PM_{10} no cuentan con suficientes puntos de monitoreo como para realizar una interpolación espacial, aunque estos podrían ser eventualmente incluidos en el índice.

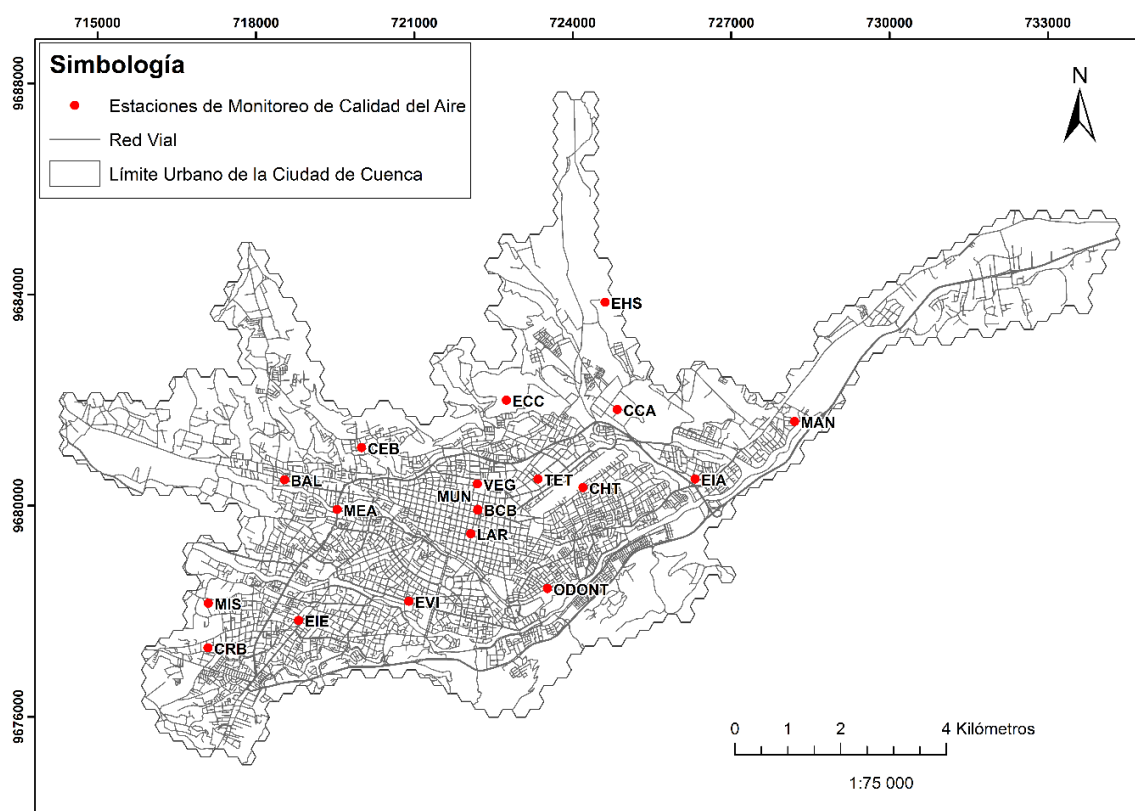


Figura 3: Sub-red pasiva de monitoreo de calidad del aire de la EMOV-EP, Cuenca

La información sobre contaminación auditiva proviene de un estudio realizado por el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador – IERSE, de la Universidad del Azuay (Delgado y Martínez, 2015). Esta información consiste en datos de presión sonora en 30 puntos de la ciudad (Figura 4) para los años 2014 y 2015 (Anexo 3). Para cada punto se realizaron mediciones con sonómetro SoundPro DL en 6 horarios distintos (07h00, 10h00, 13h00, 15h00, 18h00 y 21h00) en un día de semana. En cada punto se calculó el promedio de presión sonora para cada año analizado (Anexo 3), existiendo ausencia de información con una resolución temporal que permita analizar diferencias entre meses del año.

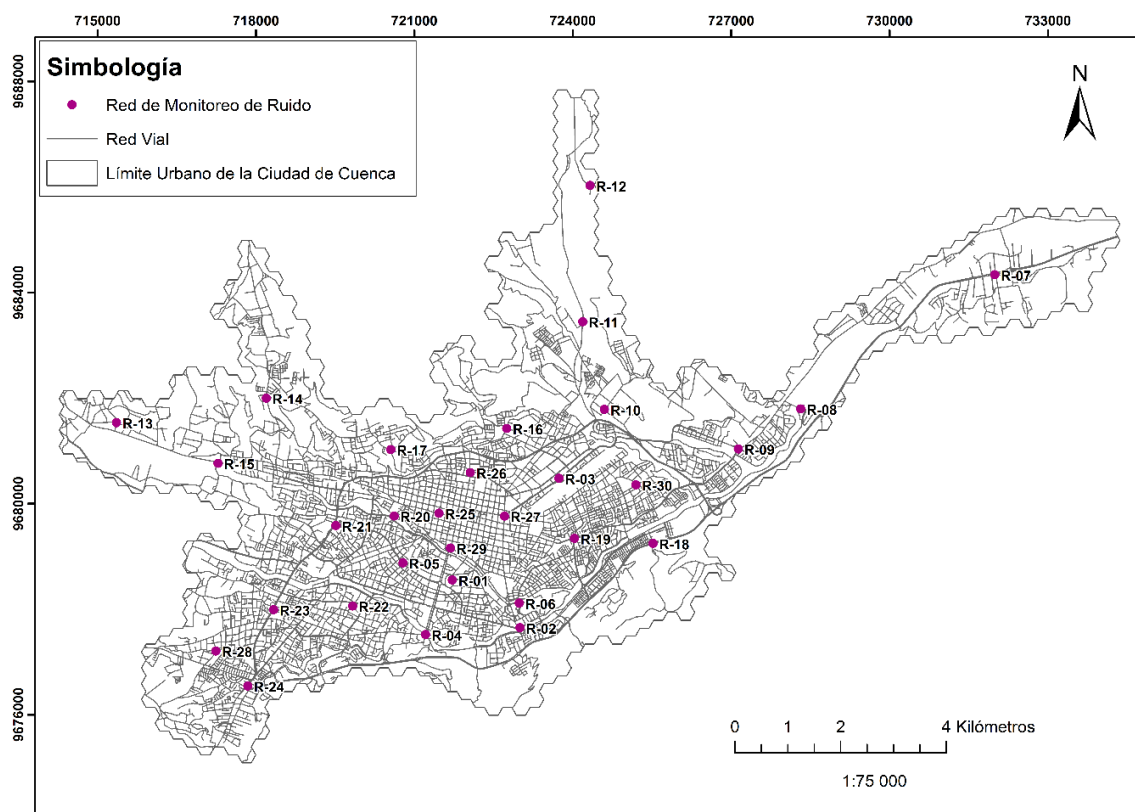


Figura 4: Estaciones de monitoreo de ruido en la ciudad de Cuenca

3.3.3. Datos geográficos adicionales

Se utilizó una capa vectorial correspondiente a una malla hexagonal sobrepuesta a la superficie urbana de la ciudad proveniente del grupo de investigación LlaCtaLAB de la Universidad de Cuenca, la cual se compone por 1097 hexágonos de 7.8 hectáreas, utilizadas para los análisis estadísticos de los indicadores ambientales generados. Además se utilizó una capa vectorial que delimita el perímetro urbano de la ciudad. Los puntos de monitoreo *in situ* fueron geográficamente localizados y vectorizados para su visualización y procesamiento.

3.4. Obtención de indicadores ambientales

En esta fase se generaron capas raster para cada uno de los indicadores seleccionados. Luego se calculó la media de cada indicador para cada una de las celdas de la malla hexagonal utilizada para el análisis. Todos los procesos fueron realizados en el software QGIS 8.1 y en el lenguaje de programación R.

3.4.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es uno de los indicadores de áreas verdes más utilizados y permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie, caracterizando su distribución espacial y su evolución a lo largo del tiempo. Utiliza las bandas de rojo e infrarrojo cercano ya que la vegetación refleja la radiación en estas bandas, siendo esta su firma espectral. El índice varía de -1 a +1, siendo los valores negativos los que representan cuerpos negros como el agua. Las nubes están dentro del rango negativo presentando valores cercanos a cero. El suelo desnudo está entre 0 y 0.20, valor a partir del cual se considera la vegetación rala con valores entre 0.20 y 0.50 hasta vegetación muy densa con valores cercanos a 1 (Carlson y Ripley, 1997).

El índice se calculó a partir de las bandas RED (rojo – banda 4 en Landsat 8) y NIR (infrarrojo cercano – banda 5 en Landsat 8) aplicando la ecuación (1):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

3.4.2. Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI)

Existe una gran variedad de modificaciones del NDVI, tales como el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI), los cuales adicionan la corrección de la perturbación que puede causar el suelo (línea del suelo) en zonas de escasa cobertura vegetal, donde el valor de 0 es igual a suelo desnudo y valores mayores representan vegetación (Manrique, 1999).

El cálculo del índice TSAVI se calculó utilizando la ecuación 2:

$$TSAVI = \frac{b(NIR - bRED - a)}{aNIR + RED - (ab) + X(1 + b^2)}$$
$$X = \text{Factor de corrección del suelo (0.08)} \quad (2)$$

Los valores de la pendiente (b) y el intercepto (a) de la línea del suelo, se obtuvieron con los siguientes pasos:

- a) Se creó una composición de color natural con las bandas RED, GREEN, BLUE (RGB) correspondientes a las bandas 432 en Landsat 8 para identificar el área urbana de la ciudad.
- b) Se obtuvo los valores de reflectancia de las bandas NIR y RED en 40 puntos distribuidos sobre suelo desnudo o urbano. La matriz generada se puede observar en Anexo 5.

- c) Con estos datos se calculó la recta de regresión lineal que representa la línea del suelo de cada imagen. De esta recta se obtuvieron los valores de la pendiente y el intercepto y el valor R^2 .

3.4.3. Índice de Humedad en las Hojas (LWCI)

Es un indicador que se correlaciona perfectamente con los mencionados anteriormente y es el índice de humedad en las hojas (LWCI) cuyos valores bajos representan zonas con escasa humedad foliar, y los valores altos mayor contenido de humedad (Manrique, 1999).

Para el cálculo de LWCI se utilizó la ecuación 3 (Hunt et al., 1987).

$$LWCI = \frac{-\log[1-(NIR-SWIR)]}{-\log[1-(NIR_{FT}-SWIR_{FT})]} \quad (3)$$

Donde,

NIR: banda correspondiente al infrarrojo cercano, en Landsat 8 corresponde a la banda 5.

SWIR: banda correspondiente al infrarrojo de onda corta, en Landsat 8 corresponde a la banda 6.

NIR_{FT} : reflectividad de la energía de la banda del infrarrojo cercano para las hojas con máxima presión de turgencia.

$SWIR_{FT}$: reflectividad de la energía de la banda del infrarrojo de onda corta para las hojas con máxima presión de turgencia.

Los valores de NIR_{FT} y $SWIR_{FT}$ se analizaron para cada una de las imágenes de manera que se pudo determinar la máxima reflectividad en la vegetación de desarrollo en condiciones de alta humedad. Para este proceso se utilizó una capa vectorial con 16 puntos distribuidos en área de vegetación con alta reflectividad (Anexo 6), obteniendo como resultado valores a las orillas de los ríos de la ciudad.

3.4.4. Índice de suelos normalizado (NSI)

El índice de suelos normalizado NSI, permite analizar la cantidad de suelo edificado que abarca la superficie urbana, de tal manera que a medida que exista una mayor área construida o impermeable, los valores son más altos, lo que determina valores bajos de NDVI, y un aumento de la temperatura superficial (TS), por mayor capacidad de absorción de calor y conductividad térmica de los materiales de las construcciones, es decir, a mayores valores de NSI y de TS, menor calidad ambiental (Yuan y Bauer, 2007).

El NSI se calculó con ayuda de la calculadora ráster aplicando la ecuación 4 (Rogers y Kearney, 2004):

$$NSI = \frac{(SWIR - NIR)}{SWIR + NIR} \quad (4)$$

Donde,

NIR: banda correspondiente al infrarrojo cercano, en Landsat 8 corresponde a la banda 5.

SWIR: banda correspondiente al infrarrojo de onda corta, banda 6 en Landsat 8.

3.4.5. Temperatura de la Superficie (TS)

A partir de los datos de infrarrojo térmico contenidos en la banda 10 del satélite Landsat 8 se pudo obtener valores de temperatura de la superficie terrestre, variable de gran importancia para estudios medioambientales, referentes principalmente a islas de calor (Jiménez et al., 2010).

La temperatura de la superficie fue obtenida de manera semiautomática mediante el complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* en QGIS. Los fundamentos de su cálculo se describen a continuación:

- a) Para obtener la temperatura de superficie, la radiancia espectral a nivel de sensor en la banda térmica 10, fue transformada a temperatura de brillo del satélite, usando la ecuación 5 (Landsat Project Science Office, 2013):

$$T_L = \frac{K_2}{\ln\left(\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1\right)} \quad (5)$$

Donde:

T_L : temperatura de brillo en grados Kelvin, para una radiancia L .

L_λ : producto de la fórmula de radiancia.

K_1 : constante de calibración 1, obtenida del metadato de la imagen.

K_2 : constante de calibración 2, obtenida del metadato de la imagen.

- b) Esta temperatura de brillo está referida como la de un cuerpo negro; por tanto fue necesario introducir valores de emisividad de la superficie de la tierra, mediante una clasificación supervisada por macro-clases, para obtener la temperatura cinética de superficie, mediante la ecuación 6 (Weng, Lu, y Schubring, 2004):

$$TS = \frac{T_L}{1 + (\lambda * T_L / \rho) * \ln \varepsilon} \quad (6)$$

Donde:

T_S : temperatura de superficie corregida con la emisividad.

T_L : temperatura de brillo del satélite.

λ : longitud de onda media de la banda termal considerada;

$$\rho = h * c / \sigma, (1,438 * 10^{-2} mK) \quad (7)$$

h : constante de Planck ($6,626 * 10^{-34}$ Js),

c : velocidad de la luz;

σ : constante de Boltzman ($1,38 * 10^{-23}$ J/K)

ε : emisividad de la superficie.

c) Para calcular la emisividad de las coberturas, se utilizó la ecuación 8 definida por (Li et al., 2004):

$$E = f_v \varepsilon_v + (1 - f_v) \varepsilon_s \quad (8)$$

Donde,

ε_v y ε_s : emisividad de las cubiertas de vegetación y de suelo urbano, respectivamente; se asumió que estas fueron de 0.98 y 0.94.

f_v : fracción de vegetación, obtenida con la ecuación 9 por medio del NDVI, uno de los índices de vegetación más usado (Choudhury et al., 1994).

$$f_v = 1 - \left(\frac{(NDVI_{MAX} - NDVI)}{(NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN})} \right)^a \quad (9)$$

$NDVI_{MAX}$: valor de NDVI máximo para la vegetación de mayor verdor;

$NDVI_{MIN}$: NDVI mínimo presente en suelo desnudo.

A pesar de que en el índice de NDVI existen valores negativos, especialmente en superficies de agua y nubes se considera un valor mínimo de 0. El exponente a es un valor que depende de la orientación de las hojas de las plantas, y se toma un valor de 0.6 (Li et al., 2004).

d) Finalmente la temperatura de superficie corregida con la emisividad (T_S), en grados Kelvin, fue convertida a grados Celsius sustrayendo el valor de 273 a todos los píxeles de la imagen de T_S .

3.4.6. Indicador de ruido

Ya que los indicadores relacionados a ruido y contaminación son tomados por sensores *in situ* localizados en ubicaciones puntuales, estos datos deben ser interpolados para cubrir el área de estudio completa (Velázquez y Celemin, 2011). Según Murillo et al. (2012), el método de interpolación más apropiado para variables de ruido y contaminantes atmosféricos es el

método de Kriging basado en la auto-correlación espacial de las variables. Kriging es un estimador local estadístico que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos, asumiendo que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias, aunque es posible implementar algunos procesos cuando estas condiciones no se cumplen (Stein, 2012).

De esta manera, a partir de los datos de las estaciones de monitoreo de ruido para los años 2014 y 2015, se obtuvieron mapas continuos de ruido utilizando un interpolador de Kriging Ordinario, debido a su naturaleza y su variabilidad espacio – temporal. Los datos del ráster generado fueron agregados en la malla hexagonal de la obteniendo el valor medio ruido por cada celda.

3.4.7. Indicador de calidad del aire

Para la calidad del aire, se seleccionaron dos contaminantes importantes al momento de medir la contaminación atmosférica como son el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el ozono (O_3). Un indicador importante para la determinación de la calidad del aire es el material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), sin embargo, el mismo no se incluyó en el estudio debido a que existen únicamente 3 estaciones de monitoreo dentro de la red de medición de calidad de aire lo que impide su interpolación geoestadística.

Al igual que la información de contaminación acústica, tanto el NO_2 y O_3 fueron interpolados con el método de Kriging Ordinario, tomando los valores correspondientes a los promedios mensuales correspondientes a la fecha de las imágenes satelitales seleccionadas para este estudio. A partir de los datos se generó una capa de información ráster que cubre la superficie urbana de la ciudad, que a su vez fue agragada en las celdas de la malla hexagonal.

3.5. Construcción de índice compuesto

Una vez que cada indicador es representado espacialmente de manera continua y exhaustiva, es decir, que se conoce el valor de cada variable para cualquier punto del área de estudio sea por medición o estimación, es necesario combinar los indicadores para formar un índice compuesto que resume en una escala sintética la información de cada variable. Entre los diversos métodos que existen para combinar indicadores, en la presente investigación se han implementado dos, el análisis Multi-Criterio y el análisis de componentes principales.

3.5.1. Índice de Calidad Ambiental Multicriterio (ICA_{MC})

Para la elaboración del índice sintético multi criterio se procedió inicialmente a realizar una reclasificación de los indicadores que componen el índice a una escala común con valores entre 1 (*muy deficiente*) a 5 (*muy buena*).

En este punto es importante tomar en cuenta que es posible asignar un peso a cada indicador de manera que el índice compuesto sea ponderado según la importancia relativa de cada dimensión o indicador (Estévez, 1977). En esta investigación, sin embargo, se ha optado por no realizar una ponderación para mantener el principio de parsimonia tal como se indicó en el modelo conceptual. Por lo tanto, el Índice Sintético Multicriterio se calcula como la media aritmética de los valores reclasificados de cada indicador (Ecuación 10):

$$ICA_{MC} = \sum_{i=1}^n X_i / n \quad (10)$$

Donde,

ICA_{MC} : índice de calidad ambiental,

X_i : indicador o componente reclasificado,

n : número de indicadores a incluir en el índice final

La reclasificación de los componentes se realizó siguiendo los siguientes parámetros, basados en la normativa ambiental aplicable, estándares internacionales e investigaciones previas:

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Transformado (TSAVI)

Considerando la alta correlación existente entre los componentes como NDVI, LWCI y TSAVI, debido a que son indicadores de áreas verdes, se reclasificó únicamente el TSAVI para evitar redundancia de información.

Para establecer los rangos de reclasificación se consideró que según la Organización Mundial de la Salud, se debe mantener como mínimo nueve metros cuadrados de área verde por habitante (Arjmand, 2016). Considerando que la malla con la que se trabajó en el presente estudio, contiene celdas hexagonales con un área de 7.8 hectáreas cada una, se estableció que por lo menos un diez por ciento de esta superficie (7800 m²) debería considerarse vegetación (valores mayores a 0.2 en el índice TSAVI generado). La Tabla 4 presenta los rangos de reclasificación para esta variable.

Tabla 4. Recategorización de índice TSAVI

Clase	Área verde (m ²)	Rango TSAVI	Valoración
1	< 500	<0.20	Muy deficiente
2	500-1000	0.20-0.40	Deficiente
3	1000-2500	0.40-0.60	Regular
4	2500-5000	0.60-0.70	Bueno
5	>5000	>0.70	Muy bueno

Fuente: Adaptado de OMS

Índice de Suelo Normalizado (NSI)

La recategorización del NSI se basó directamente en el cálculo anterior, en función de la superficie de área verde a la inversa. Por tanto, se consideró un noventa por ciento de área densamente construida como la situación con mayor deterioro. Los valores de los rangos para la reclasificación del NSI se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Recategorización de índice NSI

Clase	Área construida (ha)	Rango NSI	Valoración
1	>5	>0.30	Muy deficiente
2	4-5	0.20-0.30	Deficiente
3	3-4	0.10-0.20	Regular
4	2-3	0.05-0.10	Bueno
5	<2	<0.05	Muy bueno

Fuente: Adaptado de OMS

Temperatura del Suelo (TS)

Según la revisión de literatura, temperaturas entre los 18°C y 22°C son consideradas confortables para el ser humano, conociendo además que valores superiores a 30°C corresponden a las llamadas islas de calor. Los rangos establecidos para esta variable se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Recategorización de temperatura del suelo

Clase	Temperatura (°C)	Valoración
1	>30	Muy deficiente
2	25 - 30	Deficiente
3	20-25	Regular
4	15 - 20	Bueno
5	<15	Muy bueno

Fuente: Adaptado de Cordero (2014)

Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NO_2)

De acuerdo con los límites máximos permisibles establecidos tanto por la OMS, se consideran las concentraciones de dióxido de nitrógeno que superen los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en todas las muestras en un año como el estado con mayor deterioro. En este caso, no se consideró la normativa ecuatoriana ya que la misma presenta un límite demasiado elevado. Los rangos establecidos para la recategorización se observan en la Tabla 7.

Tabla 7: Recategorización de concentraciones de NO_2

Clase	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valoración
1	>40	Muy deficiente
2	35 – 40	Deficiente
3	30-35	Regular
4	20-30	Bueno
5	0-20	Muy bueno

Fuente: Adaptado de OMS

Concentración de Ozono (O_3)

Para reclasificar las concentraciones de ozono se aplicó el límite máximo permisible tanto para la OMS como para la normativa ecuatoriana, considerando que la máxima concentración de ozono obtenida mediante una muestra continua de un periodo de ocho horas, no deberá exceder de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, más de una vez al año. Los rangos establecidos para esta variable se observan en la Tabla 8.

Tabla 8: Recategorización de concentraciones de ozono

Clase	O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valoración
1	>100	Muy deficiente
2	75-100	Deficiente
3	50-75	Regular
4	25-50	Bueno
5	0-25	Muy bueno

Fuente: Adaptado de OMS y TULSMA

Ruido

La reclasificación de ruido se basó en los límites establecidos por la OMS, donde se considera a 65 dB como un valor de presión sonora confortable para el oído humano. Los rangos utilizados se especifican en la Tabla 9.

Tabla 9: Recategorización de niveles de ruido

Clase	Ruido (dB)	Valoración
1	>75	Muy deficiente
2	60 - 75	Deficiente
3	40 - 60	Regular
4	25-40	Bueno
5	<25	Muy bueno

Fuente: Adaptado de OMS

3.5.2. Índice de Calidad Ambiental basado en Componentes Principales (ICA_{CP})

Para construir el ICA basado en Componentes Principales (ICA_{CP}) se evaluó en primer lugar la idoneidad de reducción de la dimensionalidad mediante el test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). Este índice toma valores entre 0 y 1, obteniendo valores individuales para cada variable y un valor global para el conjunto de datos. Cuando el índice es mayor a 0.7, el ACP que se realice es bastante aceptable, considerando además que valores por debajo de 0.5 sugieren evitar el análisis de los datos con ACP (Beavers et al., 2013). Si los valores globales para el conjunto de datos son deficientes, se puede optar por eliminar aquellas variables con índice KMO individual bajos, hasta obtener una mejora en los datos globales.

El test KMO se aplicó por lo tanto a la base de datos con los ocho indicadores del ICA y el resultado del test indicó que es viable realizar un ACP. Una vez llevado a cabo el ACP, con la base de datos estandarizada para evitar influencia dimensional en el análisis, se retuvieron aquellos componentes con un auto-valor mayor a 1 (Santana et al., 2010) para cada una de las imágenes analizadas, considerando que el índice resultante sea parsimonioso e interpretable (Estévez, 1977).

En tres de las cuatro imágenes, correspondientes al 26 de julio de 2014, 13 de julio de 2015 y 2 de noviembre de 2015 (con auto-valores para el segundo componente de: 1.048, 1.407 y 1.152 respectivamente), dos componentes cumplen con la condición; sin embargo para mantener la homogeneidad en el tratamiento estadístico de los datos se decidió mantener únicamente el primer componente principal para la construcción del ICA_{CP}.

Es así que se determinó que el ICA corresponde a las calificaciones o *scores* del primer componente principal resultante del ACP. Estos valores permitieron elaborar mapas temáticos

a partir de la malla hexagonal que indican el comportamiento de la calidad ambiental urbana, que se clasificaron según las desviaciones estándar del promedio de la ciudad, en una escala cualitativa que se indica en la Tabla 10.

Tabla 10: Escala Cualitativa para ICA a partir de ACP

Valor de Desviación Estándar	Clase
> 1.5	Muy Bueno
$1.5 - 0.5$	Bueno
$0.5 - -0.5$	Regular
$-0.5 - -1.5$	Deficiente
< -1.5	Muy Deficiente

3.6. Exploración Espacial y Temporal.

Una vez obtenido los valores para el ICA a partir de ACP se evaluaron patrones espaciales y temporales entre las distintas imágenes integradas al estudio, comparando a través una matriz de correlaciones las relaciones entre las diferentes fechas, así como análisis de varianza ANOVA. Las fechas analizadas corresponden a las épocas secas y lluviosas de los años 2014 y 2015.

4. Resultados y Discusión

4.1. *Análisis de indicadores de espacios verdes, ruido y calidad del aire*

4.1.1. *Análisis temporal y espacial de indicadores*

Se realizó un análisis temporal y espacial de los indicadores de manera individual, evaluando las correlaciones que existen para un mismo indicador en distintas fechas (Tabla 11), y además se compararon los patrones espaciales y sus cambios a través del tiempo a partir de mapas temáticos.

Existen correlaciones altas entre fechas para los indicadores generados a partir de las imágenes satelitales como son el NDVI, TSAVI, LWCI, NSI. Además se observa una alta correlación entre fechas para la variable de dióxido de nitrógeno. Una tendencia importante a destacar del análisis global de correlación es que las imágenes del 26 de julio de 2014 y 30 de octubre de 2014 se encuentran altamente correlacionadas en todos los indicadores; dándose una tendencia similar para las imágenes del 30 de octubre de 2014 y 2 de noviembre de 2015, a excepción de la variable ozono. Las imágenes correspondientes al mes de julio tanto 2014 como 2015 no presentan una correlación tan alta como las tendencias previamente mencionadas a excepción del indicador de dióxido de nitrógeno.

A partir de esta matriz de correlaciones, se puede concluir que los indicadores provenientes de imágenes satelitales no presentan variaciones significativas a lo largo del tiempo ni del espacio, a excepción de los datos de temperatura del suelo que presentan correlaciones menores en relación a las demás variables. Los datos de calidad del aire por su parte presentan tendencias distintas, observando que la variable de dióxido de nitrógeno mantiene concordancia a lo largo del tiempo y del espacio; mientras que el ozono presenta relaciones poco significativas entre los años de estudio, manteniendo correlaciones significativas entre los meses de julio y octubre para el 2014 y julio y noviembre para el 2015. Para el caso de datos de ruido, cabe recalcar que únicamente se cuenta con valores anuales, por lo que la matriz de correlación únicamente indica el coeficiente de determinación entre los años 2014 y 2015, manteniendo cierta relación espacial (0.856).

Tabla 11: Matriz de correlaciones por indicador para las distintas fechas de estudio

NDVI				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.968	1.000		
13/7/2015	0.918	0.929	1.000	
2/11/2015	0.955	0.980	0.923	1.000
TSAVI				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.864	1.000		
13/7/2015	0.831	0.870	1.000	
2/11/2015	0.842	0.963	0.866	1.000
LWCI				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.921	1.000		
13/7/2015	0.907	0.895	1.000	
2/11/2015	0.863	0.927	0.862	1.000
NSI				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.939	1.000		
13/7/2015	0.907	0.906	1.000	
2/11/2015	0.901	0.942	0.873	1.000
TEMPERATURA				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.772	1.000		
13/7/2015	0.542	0.522	1.000	
2/11/2015	0.700	0.800	0.503	1.000
NO₂				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.900	1.000		
13/7/2015	0.958	0.894	1.000	
2/11/2015	0.934	0.901	0.888	1.000
O₃				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.879	1.000		
13/7/2015	0.319	0.036	1.000	
2/11/2015	-0.201	-0.307	0.534	1.000
RUIDO				
	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	1.000	1.000		
13/7/2015	0.856	0.856	1.000	
2/11/2015	0.856	0.856	1.000	1.000

Los mapas de los indicadores generados, dentro de la malla hexagonal permitieron realizar una comparación visual de los cambios de los mismos en las distintas fechas del estudio. Según Meneses-Tovar (2011), si se desea realizar una comparación entre años de los cambios de aquellos indicadores generados a partir de imágenes satelitales es importante tomar en cuenta que se realice en la misma época del año, para evitar cambios en la calidad de luz, la geometría de la observación e inclusive cambios de comportamiento fenológico en el caso de índices de vegetación.

Las comparaciones se realizaron en función de las parroquias urbanas y sitios de interés de la ciudad, como se observa en la Figura 5, a partir de la cual se pudo analizar según su uso de suelo y conocimiento empírico de la zona, los resultados obtenidos para los distintos indicadores.

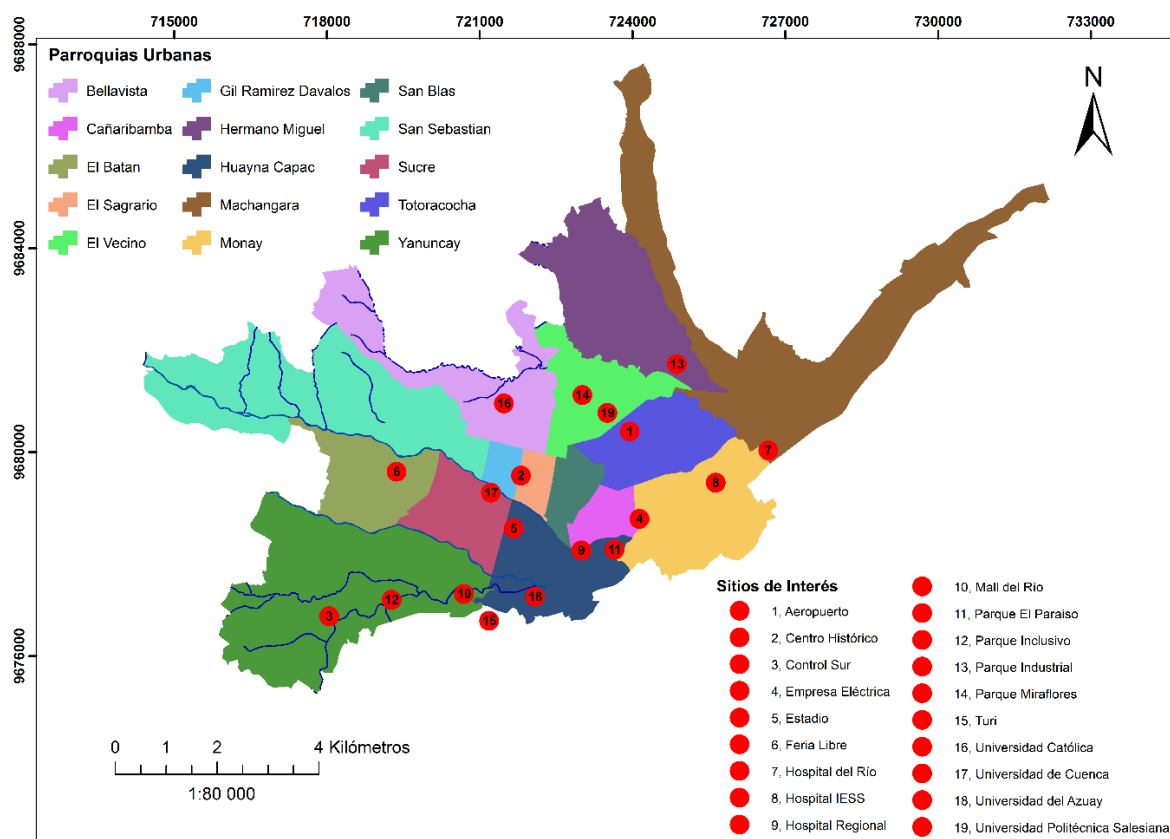


Figura 5: Sitios de interés y su ubicación dentro de las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca

Para el caso de los indicadores relacionados a la vegetación aplicados en el presente estudio (Figura 6, Figura 7 y Figura 8), se observa una tendencia general que indica valores menores en la parte central de la ciudad, donde se ubica el centro histórico, significando esto construcciones densas y con pocos espacios verdes, adicionando además la zona del aeropuerto y parque industrial ubicado al este de la ciudad y la zona de la feria libre al oeste;

lugares donde se observan valores correspondientes a suelo desnudo para los índices NDVI y TSAVI y valores de humedad mínima para el LWCI. En la zona este de la parroquia Machángara, donde se ubican sitios como Capulispamba, lugar donde se realiza la revisión vehicular, donde la calidad ambiental se encuentra entre *regular y deficiente*.

Por otra parte, los valores para estos indicadores aumentan a medida que se acercan a la periferia de la ciudad, indicando una mayor calidad ambiental tanto por la presencia de vegetación como por el aumento de humedad que esta genera. Sitios importantes a destacar son el Parque Inclusivo al suroeste de la ciudad, el Parque Miraflores al norte, Parque Paraíso ubicado al sureste, así como zonas periféricas de las parroquias San Sebastián al oeste, Hermano Miguel y Machángara al noreste, Yanuncay, Huayna-Cápac y Monay al sur.

En relación al análisis temporal de los indicadores de vegetación se observa que en general, las imágenes correspondientes al mes de julio, es decir, época seca para la sierra ecuatoriana, presentan valores mayores, es decir, vegetación de mayor densidad, tanto para NDVI y TSAVI, así como mayor humedad según el LWCI. Mientras que para los meses de octubre y noviembre, correspondiente a la época de lluvia, los valores son menores. Esto se contradice directamente con las observaciones realizadas por Meneses-Tovar (2011), quien en su estudio realizado en México determina que épocas de mayor precipitación se relacionan directamente con mayores valores de NDVI y viceversa. En este estudio incluso se afirma que el estrés hídrico podría ser uno de los factores que determina este comportamiento en las épocas secas, favoreciendo así el verdor de la vegetación en épocas lluviosas. En un análisis de estudios realizados en Latinoamérica referente a las variaciones de NDVI por Paredes (2016), indica de igual manera esta asociación de épocas lluviosas con valores altos de NDVI, por lo cual el fenómeno presentado en la ciudad es de interés, sin embargo, no es el objeto de esta investigación determinar sus causas.

Se puede además observar que existe una disminución en los valores de un año a otro para los meses de octubre y noviembre, lo cual podría indicar cambios fenológicos y de actividad fotosintética de la vegetación. Sin embargo, esta tendencia no se observa para el mes de julio en el transcurso del tiempo, por lo que las variaciones en realidad podrían deberse a efectos directos de la recopilación de información por parte de los sensores del satélite aplicado o inclusive por la remoción de píxeles en la imagen correspondiente al 13 de julio de 2015 por la presencia de nubes. Por lo tanto, no puede asegurarse con certeza que las áreas verdes hayan disminuido o que la urbanización haya aumentado si no se realizan comparaciones con una mayor cantidad de imágenes para los dos años de estudio, análisis que se encuentran fuera del propósito de este estudio.

Este mismo fenómeno puede observarse para los indicadores correspondientes al NSI y a la Temperatura del Suelo (Figura 9 y Figura 10 respectivamente), los cuales también son generados a partir de imágenes satelitales. Por ende, se observa un aumento del área construida y de la temperatura del suelo para los meses de octubre y noviembre, pero una disminución para el mes de junio a través de los años de estudio, sugiriendo en realidad una interferencia con respecto a la calidad de la imagen.

Se observa además que la mayor proporción de área construida se encuentra en el sector del centro histórico y el parque industrial, teniendo una relación inversamente proporcional con el comportamiento de los indicadores de vegetación previamente analizados. Este indicador se puede relacionar directamente con la Temperatura del Suelo para el análisis de islas de calor dentro de la urbe. Se observa claramente que la temperatura del suelo es menor para la temporada seca (julio) que para la temporada de lluvia (octubre-noviembre) donde se obtienen temperaturas mayores a 35 °C. Esto debido a las características climáticas de la región de estudio, en la que las épocas secas se caracterizan por heladas, debido a la presencia de fuertes vientos que disminuyen la temperatura del ambiente y a su vez la temperatura del suelo, mientras que en la época de lluvia se observa el efecto contrario, ya que la ausencia de vientos eleva la temperatura ambiente y propicia la concentración de temperatura del suelo.

Aun con esta distinción se observa que zonas como el centro histórico y el parque industrial presentan altas temperaturas para todas las fechas analizadas. Estas zonas coinciden con aquellos puntos donde existe una mayor concentración de área construida, sugiriendo un efecto de isla de calor a causa del espacio edificado, redes viales y materiales de construcción como indican Cuadrat et al., (2005); y la actividad antropogénica, como son zonas de baja o nula vegetación, mayor tráfico vehicular y peatonal así como actividad industrial como sugieren Guillén y Orellana (2016), observando diferencias de temperatura entre la parte central y la periferia de 5°C. Esta disminución de temperatura del suelo hacia la periferia de la ciudad indica una relación inversa con respecto a los indicadores de vegetación aplicados. Esto corrobora el estudios realizados por Wong (2005), Cordero (2014) y Ángel et al. (2010) que sugieren que la presencia de áreas verdes pueden disminuir la temperatura entre 1°C a 5°C, dependiendo de la densidad de vegetación.

La temperatura de igual manera tiene una alta relación con contaminantes atmosféricos como es el caso del dióxido de nitrógeno (Figura 11), donde se observa que las épocas secas presentan menores concentraciones de este contaminante que las épocas de lluvia. Esto se debe a que, como indican Correa et al., (2003), el aumento de temperatura actúa como catalizador de reacciones químicas en la atmósfera, propiciando la formación de

contaminantes del aire, entre los que se encuentra el NO_2 , concentrándose especialmente en zonas donde exista alta generación de contaminantes primarios como son el centro histórico debido al tráfico vehicular y el parque industrial debido justamente a estas actividades. Aun si los valores no sobrepasen los límites establecidos por la normativa ecuatoriana ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pero están consideradas zonas críticas, propensas a una baja calidad ambiental para estas zonas.

El dióxido de nitrógeno junto con compuestos orgánicos volátiles son precursores de la generación de ozono troposférico (Galán y Fernandez, 2006). Al analizar el comportamiento del ozono, se determina que este no coincide con las observaciones realizadas por Gómez y Castañeda (2013), quienes afirman que un aumento de temperatura incide indirectamente en la elevación de las concentraciones de ozono a nivel del suelo.

En la Figura 12 se puede apreciar claramente que a diferencia del dióxido de nitrógeno, el ozono no se concentra en zonas de marcada degradación ambiental sino que se concentran mayormente en la periferia, existiendo aun así un aumento de concentraciones para estaciones lluviosas. Esto se explica según Velázquez de Castro (2001), quien describe que el ozono al ser consumido parcialmente por reacciones con dióxido de nitrógeno en su fuente, mantiene valores bajos en los sitios de emisión, además de fenómenos de dispersión de contaminantes primarios según la dirección predominante del viento, donde a su paso la radiación solar genera ozono, encontrando concentraciones mayores a sotavento de fuentes emisoras, concentrándose en las periferias.

Por último, la Figura 13 indica el promedio anual de niveles de presión sonora para los años de estudio, donde se observa un aumento del mismo para el año 2015. Cabe recalcar que en la ciudad predominan niveles de presión sonora entre los 50 dB, considerado como un nivel de confort acústico, siendo el límite para las zonas residenciales, hasta los 80 dB, los cuales se consideran ruidos molestos, sobrepasando límites máximos para la zona industrial (Ministerio del Ambiente, 2012; OMS, 2015).

Especialmente, se observa que las zonas con niveles de ruido alto se encuentran en el parque industrial y el centro histórico, donde se acumula la actividad productiva y vehicular respectivamente. Es interesante notar que los niveles de ruido sobrepasan los 80 dB en el año 2015 en zonas periféricas correspondientes a la zona de la autopista en Monay, donde inclusive se zonifica como sector hospitalario debido a la presencia del hospital del IESS. Según Delgado y Martínez (2015), el estudio se realiza en vías principales lo cual puede explicar los altos registros de la zona, sin embargo, recalcan su preocupación con respecto a estos niveles elevados en sectores donde la normativa tolera hasta 45 dB de presión sonora.

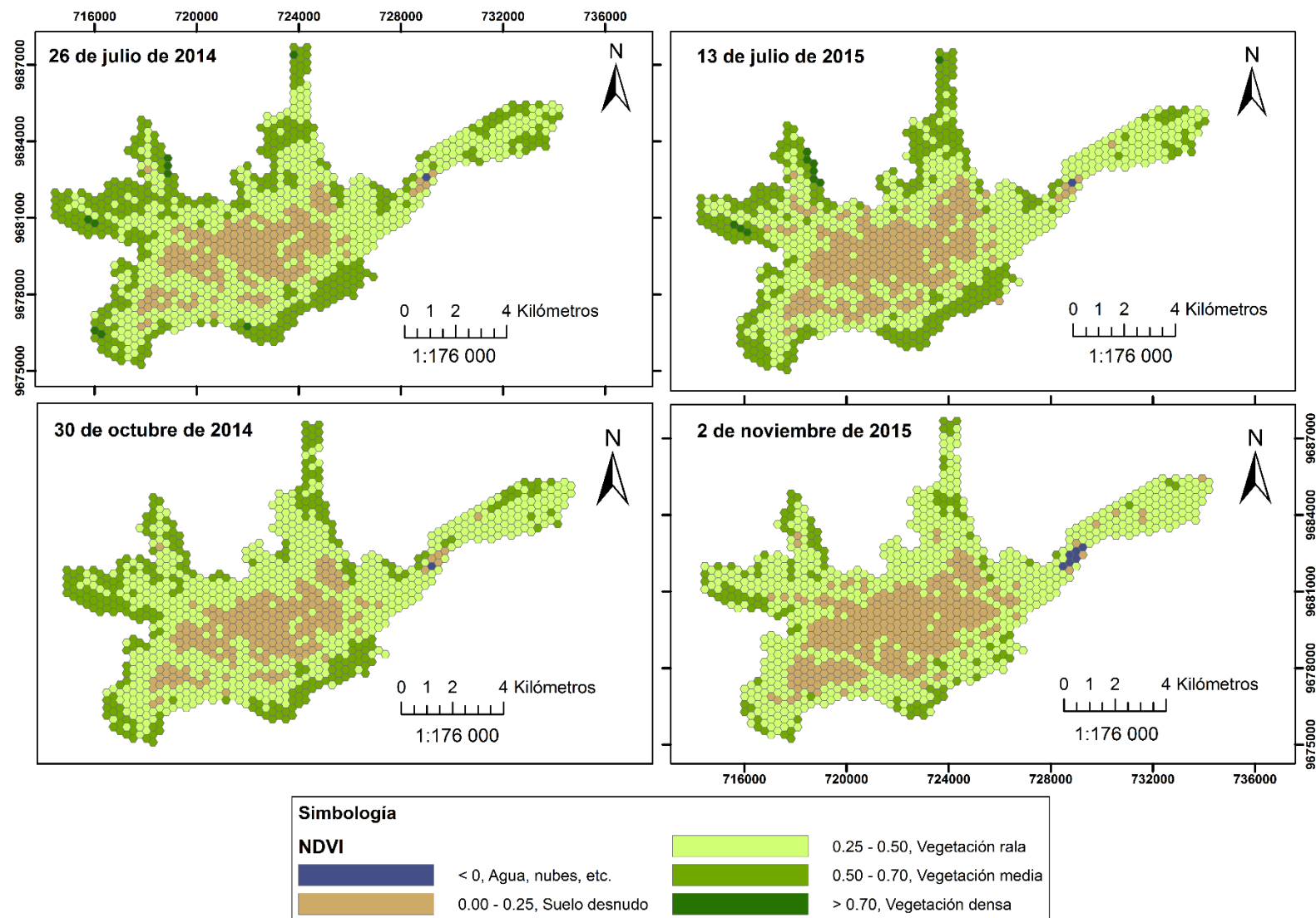


Figura 6: Comparación de NDVI para las distintas fechas de estudio

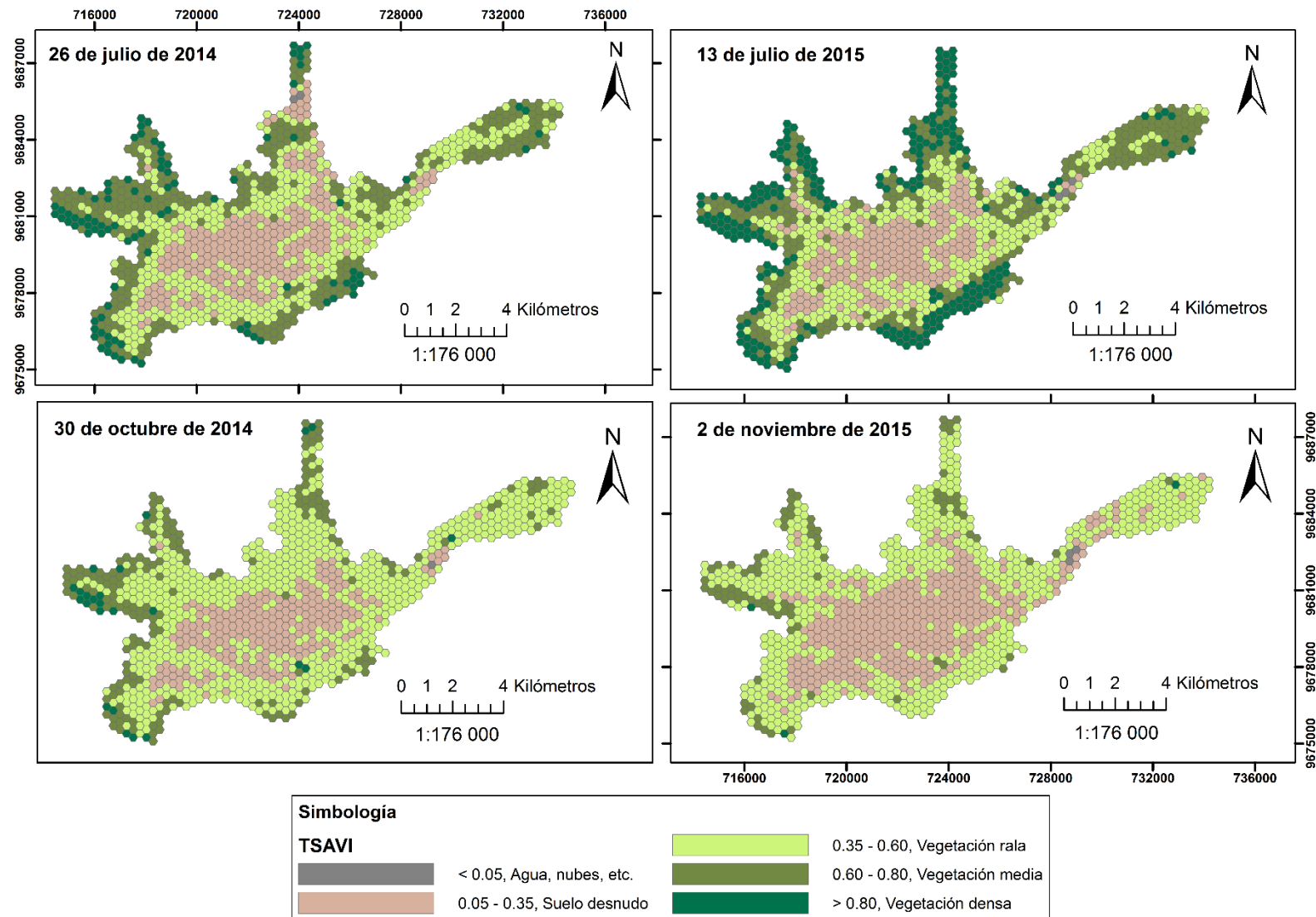


Figura 7: Comparación de TSAVI para las distintas fechas de estudio

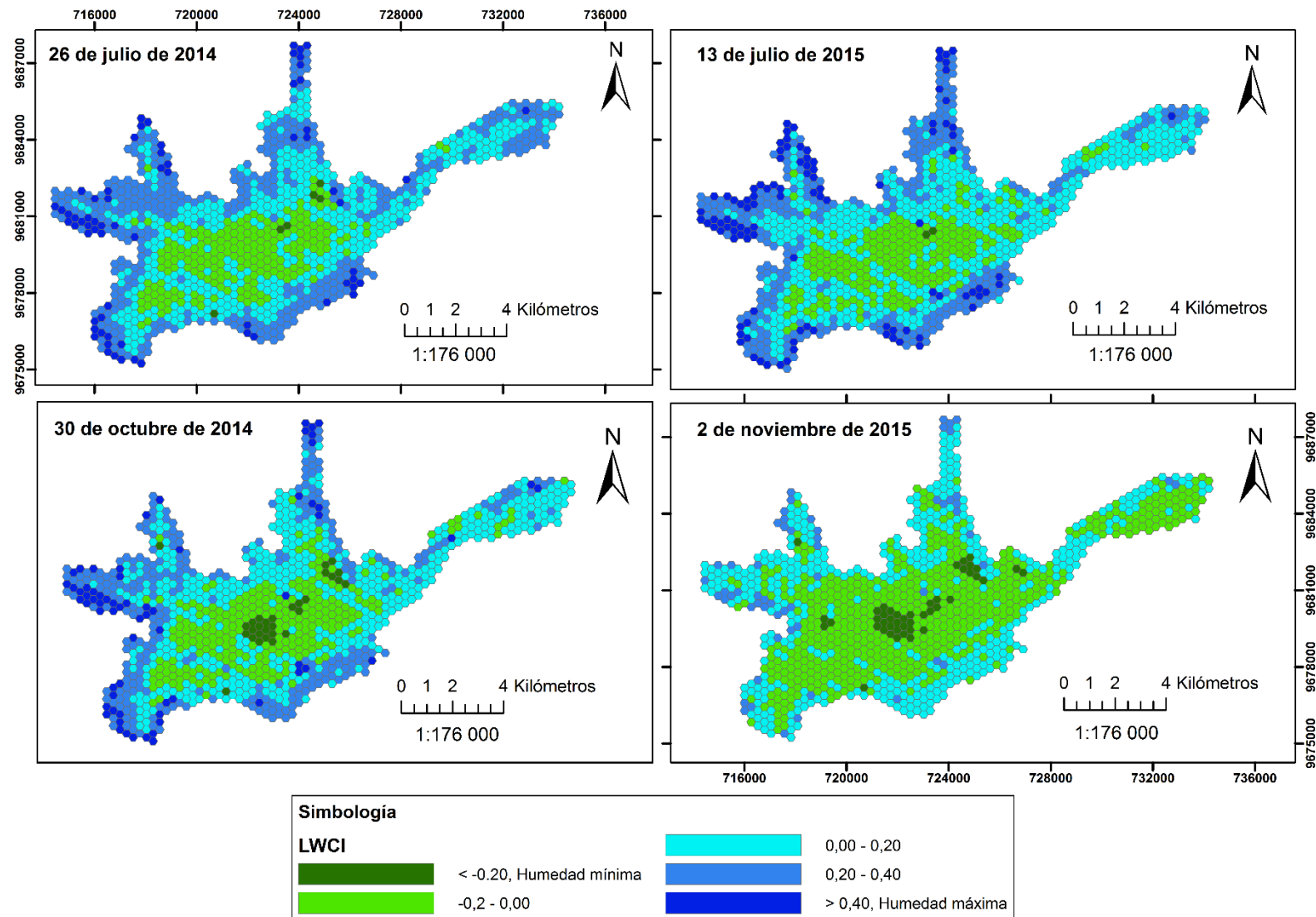


Figura 8: Comparación de LWCI para las distintas fechas de estudio

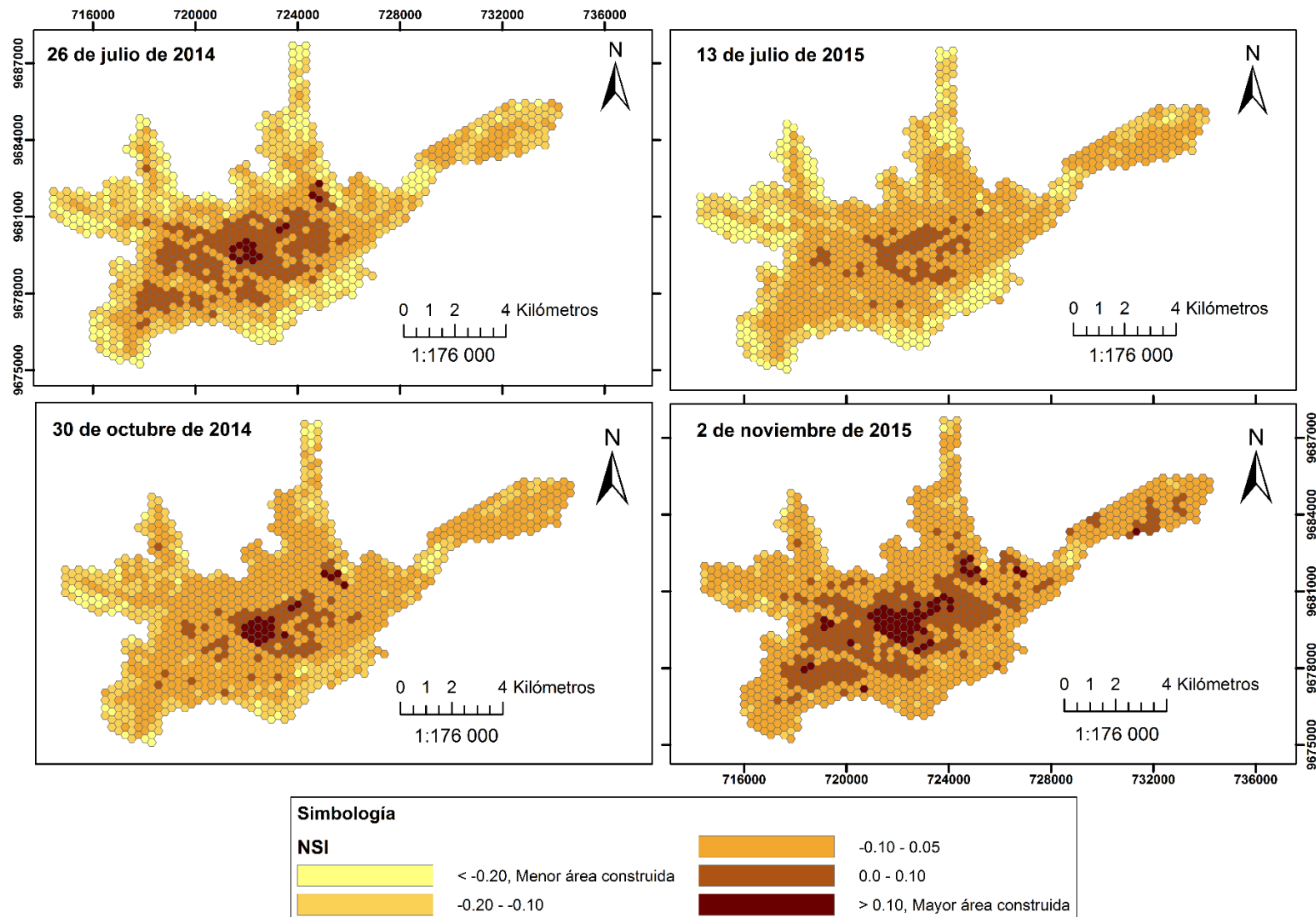


Figura 9: Comparación de NSI para las distintas fechas de estudio

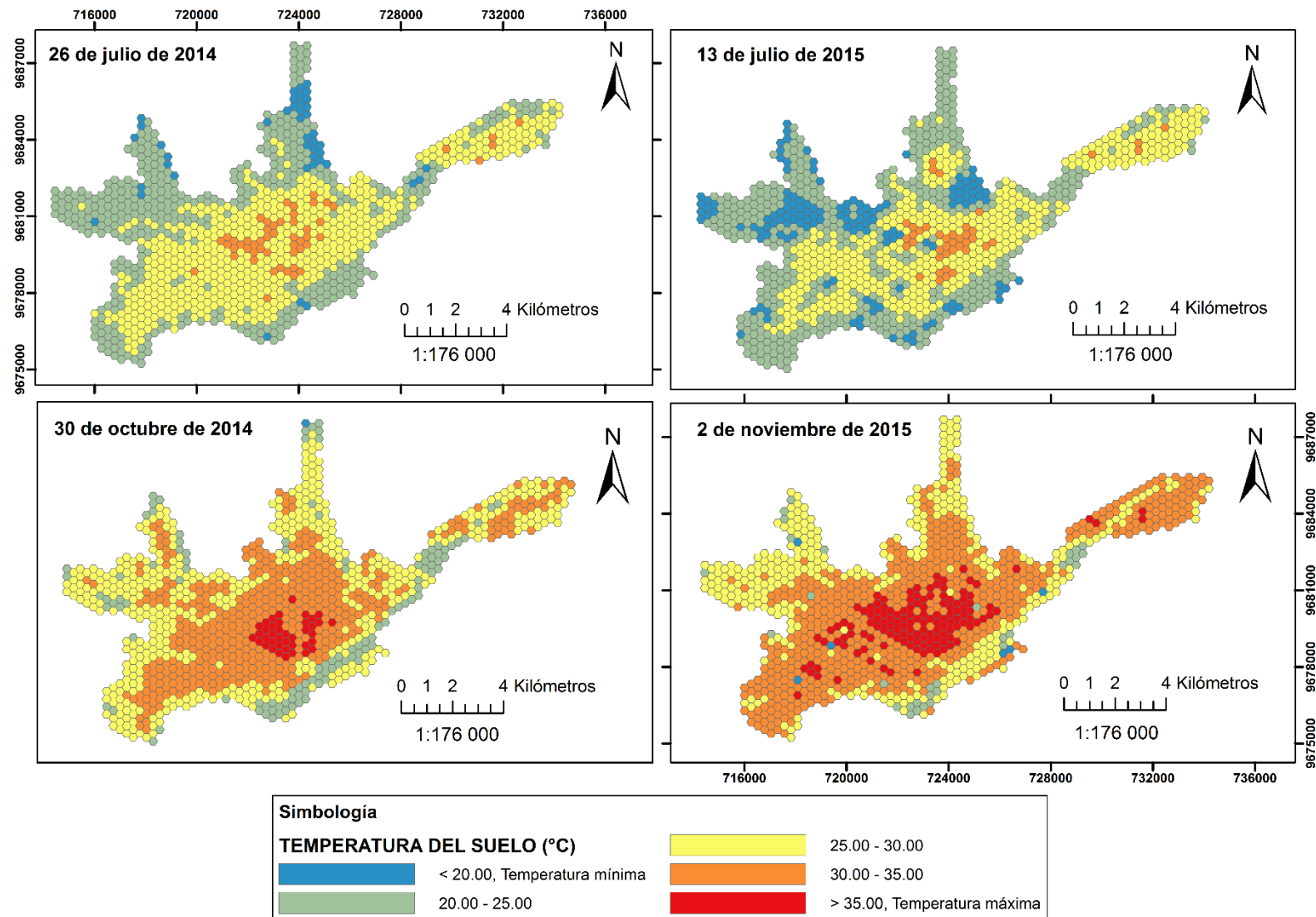


Figura 10: Comparación de Temperatura del Suelo para las distintas fechas de estudio

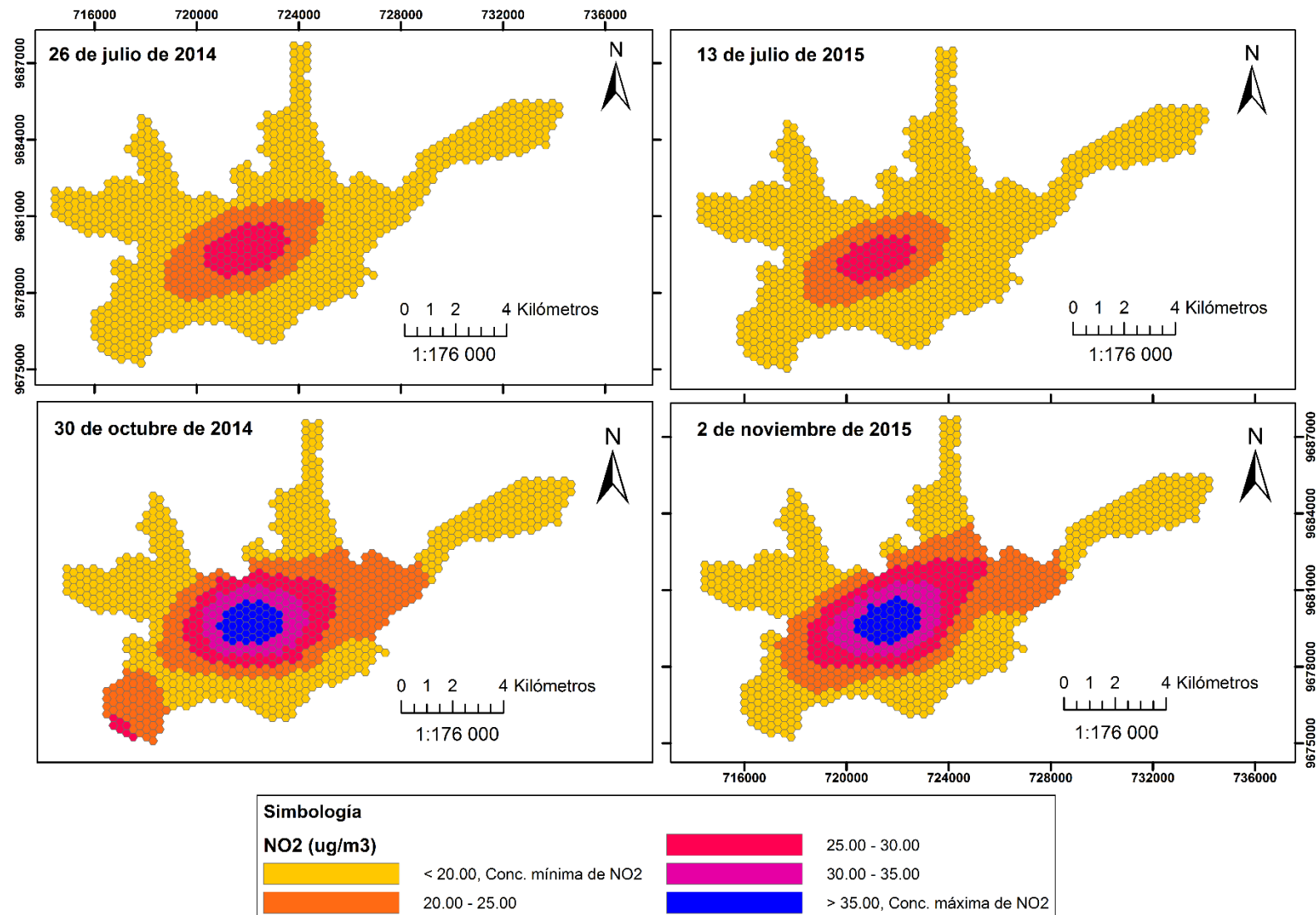


Figura 11: Comparación de dióxido de nitrógeno para las distintas fechas de estudio

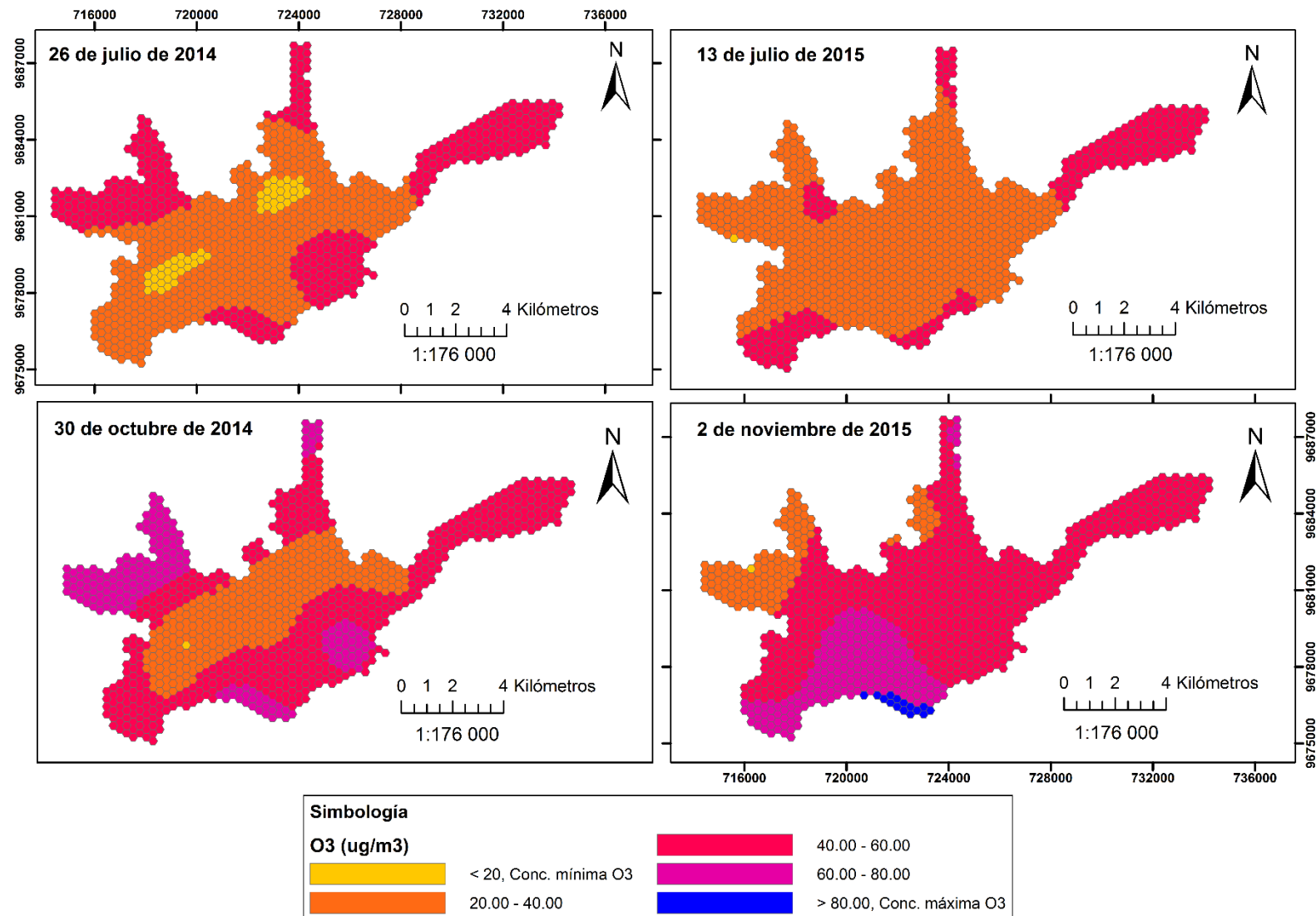


Figura 12: Comparación de ozono para las distintas fechas de estudio

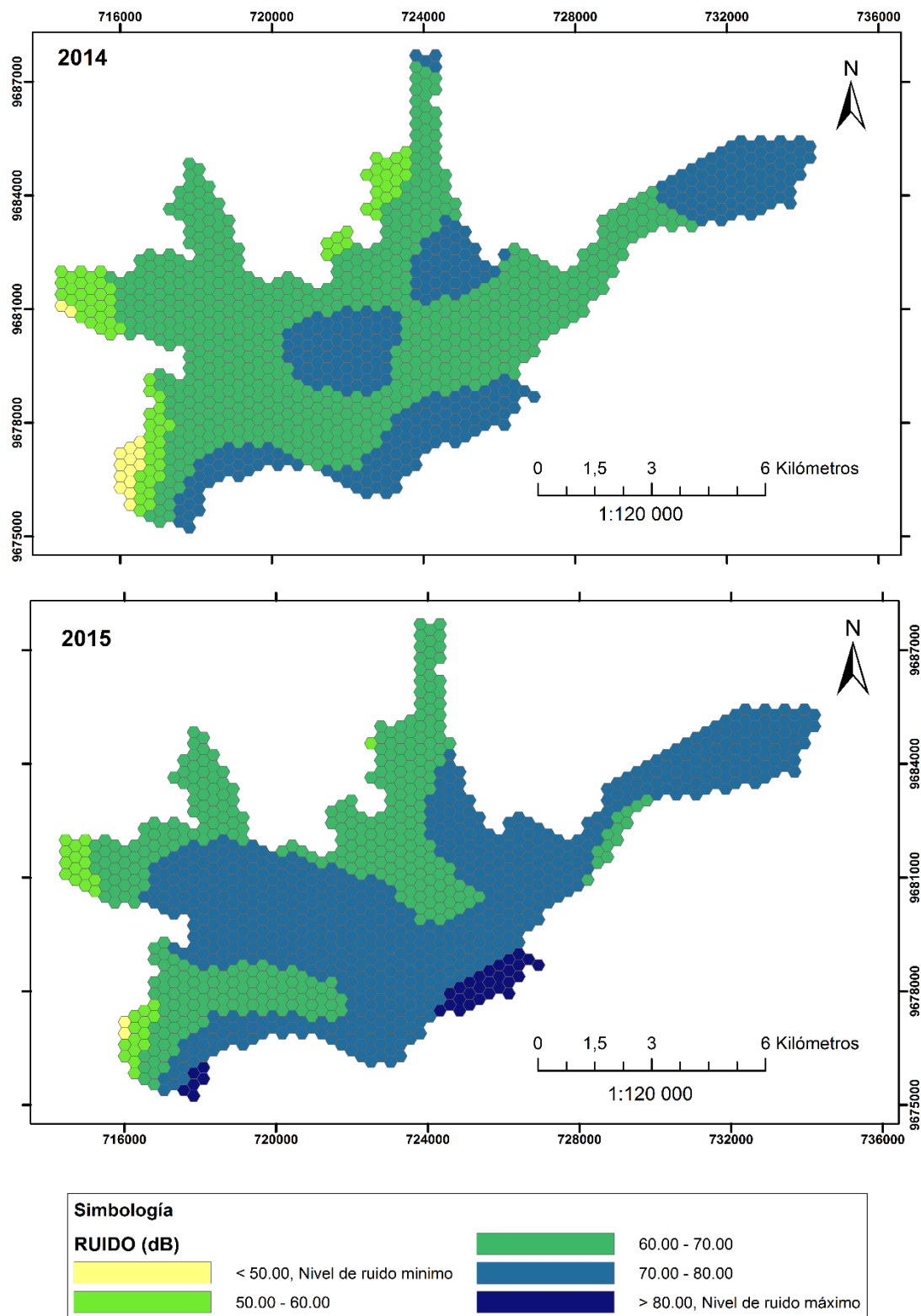


Figura 13: Comparación de ruido para las distintas fechas de estudio

4.1.2. Análisis de relaciones entre indicadores

Se analizaron las relaciones de los distintos indicadores generados para una misma fecha, proceso importante para poder llevar a cabo el ACP, pero que puede influenciar significativamente al momento de generar el índice sintético compuesto, sesgando la información generada.

En general se observa en la Tabla 12 que los valores de NDVI, TSAVI y LWCI mantienen altas correlaciones positivas para todas las fechas analizadas, indicando que mientras más densa sea la vegetación mayor será la humedad foliar retenida. Se observa además una marcada correlación positiva del NSI y la Temperatura del Suelo, ya que a mayor área construida, existe un incremento de la temperatura del suelo. Estas dos últimas variables se encuentran inversamente relacionadas a los indicadores de espacios verdes, pues en general espacios con vegetación presentan un uso de suelo no comercial ni de vivienda, disipando además la temperatura.

El dióxido de nitrógeno presenta una alta correlación con el NSI y la temperatura del suelo, indicando que las zonas más pobladas y de mayor movimiento comercial y por tanto, tráfico vehicular, como es el centro histórico presentan graves problemas de contaminación atmosférica, incluso indicando que las altas temperaturas del suelo generadas por los efectos de islas de calor propician la reacción de contaminantes primarios para la generación del dióxido de nitrógeno.

El ozono y el ruido son indicadores que dan como resultado una correlación no significativa con el resto de indicadores ambientales, debido a la complejidad y variabilidad espacio-temporal que presentan, siendo no relevantes, sin embargo estos indicadores influyen indirectamente con la calidad ambiental dentro del entorno urbano.

Las imágenes correspondientes al 26 de julio de 2014 y al 30 de octubre de 2014 son las que presentan la mayor cantidad de correlaciones significativas en especial entre valores derivados de imágenes satelitales y de fuentes de información secundaria. Sin embargo, las imágenes del 2015 presentan correlaciones menos significativas para estos indicadores, principalmente respecto a la temperatura de suelo y el ozono.

Tabla 12: Matriz de correlación por fecha de estudio para los distintos indicadores

Indicadores - 26/07/14								
	<i>NDVI</i>	<i>TSAVI</i>	<i>LWCI</i>	<i>NSI</i>	<i>TEMP.</i>	<i>NO2</i>	<i>O3</i>	<i>RUIDO</i>
NDVI	1.0000							
TSAVI	0.9347	1.0000						
LWCI	0.9549	0.9288	1.0000					
NSI	-0.9042	-0.7841	-0.9328	1.0000				
TEMP.	-0.6720	-0.4717	-0.7036	0.8112	1.0000			
NO2	-0.7139	-0.6158	-0.6969	0.7208	0.7107	1.0000		
O3	0.4565	0.4167	0.4393	-0.4442	-0.3829	-0.6718	1.0000	
RUIDO	-0.2303	-0.2397	-0.2677	0.2389	0.2583	0.3455	0.0486	1.0000
Indicadores - 30/10/14								
	<i>NDVI</i>	<i>TSAVI</i>	<i>LWCI</i>	<i>NSI</i>	<i>TEMP.</i>	<i>NO2</i>	<i>O3</i>	<i>RUIDO</i>
NDVI	1.0000							
TSAVI	0.9433	1.0000						
LWCI	0.9128	0.9383	1.0000					
NSI	-0.8806	-0.8362	-0.9520	1.0000				
TEMP.	-0.8022	-0.6776	-0.7732	0.8790	1.0000			
NO2	-0.6411	-0.5704	-0.5524	0.5933	0.5761	1.0000		
O3	0.5593	0.5289	0.5179	-0.5216	-0.4386	-0.6681	1.0000	
RUIDO	-0.2295	-0.3383	-0.3252	0.2493	0.1545	0.1594	-0.2072	1.0000
Indicadores - 13/07/15								
	<i>NDVI</i>	<i>TSAVI</i>	<i>LWCI</i>	<i>NSI</i>	<i>TEMP.</i>	<i>NO2</i>	<i>O3</i>	<i>RUIDO</i>
NDVI	1.0000							
TSAVI	0.9996	1.0000						
LWCI	0.9113	0.9117	1.0000					
NSI	-0.8613	-0.8616	-0.9270	1.0000				
TEMP.	-0.3006	-0.2978	-0.4620	0.5171	1.0000			
NO2	-0.6989	-0.6996	-0.6220	0.6124	0.2594	1.0000		
O3	0.0481	0.0494	-0.0504	0.0156	0.1259	-0.1376	1.0000	
RUIDO	-0.1782	-0.1781	-0.2448	0.1761	0.0795	0.2139	0.4040	1.0000
Indicadores - 02/11/15								
	<i>NDVI</i>	<i>TSAVI</i>	<i>LWCI</i>	<i>NSI</i>	<i>TEMP.</i>	<i>NO2</i>	<i>O3</i>	<i>RUIDO</i>
NDVI	1.000							
TSAVI	0.952	1.000						
LWCI	0.868	0.883	1.000					
NSI	-0.812	-0.799	-0.968	1.000				
TEMP.	-0.649	-0.570	-0.664	0.739	1.000			
NO2	-0.687	-0.657	-0.604	0.616	0.615	1.000		
O3	-0.291	-0.362	-0.284	0.272	0.301	0.352	1.000	
RUIDO	-0.160	-0.245	-0.209	0.183	0.119	0.222	0.331	1.000

4.2. Análisis de los índices de calidad ambiental urbanos generados a partir de métodos estadísticos multivariados

4.2.1. Análisis de ICA urbano a partir del índice sintético compuesto

El primer paso para la generación del índice sintético compuesto fue la reclasificación de las variables de estudio. Los mapas resultantes con los datos reclasificados se encuentran en el Anexo 7, recordando que para esta metodología únicamente se toman en cuenta seis indicadores (TSAVI, NSI, Temperatura del Suelo, NO₂, O₃ y Ruido). El indicador TSAVI se utilizó como representante de los indicadores de vegetación para evitar redundancia de información al momento de generar el índice, debido a las altas correlaciones que existen entre este y el NDVI y LWCI.

Al aplicar el promedio aritmético para la generación del índice sintético compuesto se asumió que los pesos asignados para cada una de las variables son equitativos, por tanto, aplicando un análisis multicriterio donde todas las variables tengan la misma influencia. En caso de la no eliminación de los indicadores NDVI y LWCI, el peso de los indicadores de vegetación, aunque equitativos, hubieran representado un mayor porcentaje ya que los indicadores esencialmente miden la misma variable. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que correlaciones negativas podrían tener el mismo efecto, como es el caso del TSAVI y NSI los cuales podrían generar ruido al momento de la generación del índice, como lo indica el manual de generación de índices de la OECD (2008).

Aun así, se aplicó la metodología obteniendo las representaciones espaciales adaptadas a la malla hexagonal del área de estudio como se observan en la Figura 14. Se observa inicialmente que el índice generado no alcanza valores de 5, correspondiente a una calidad ambiental *muy buena*, además que la cantidad de celdas con calidad ambiental *muy deficiente* correspondiente al valor de 1 es mínima, existiendo únicamente dos celdas en la valoración realizada para el 2 de noviembre de 2015. Por su parte, las celdas correspondientes a calidad ambiental *regular* (3) y *bueno* (4) son mayoría en imágenes que corresponden a la época seca del mes de julio, mientras que las imágenes de época de lluvia, en los meses de octubre y noviembre presentan una calidad ambiental predominante entre *deficiente* (2) y *regular* (3).

Sin embargo, estas evaluaciones visuales, al ser evaluadas estadísticamente, no presentaron un patrón que permita atribuir una tendencia de estacionalidad en los índices generados. Para comprobar esto se correlacionaron las cuatro imágenes obtenidas, generando los resultados que se observan en la Tabla 13. Los resultados indican que ningún índice generado a partir del análisis multicriterio para las cuatro fechas presenta una correlación significativa, siendo la mejor correlación para las imágenes del 30 de octubre de 2014 y 2 de noviembre de 2015

con un valor de 0.538. Con esto se observa que el índice generado varía significativamente en función de los datos de entrada, sin mantener un patrón que permita generalizar el mismo para el área de estudio determinada.

Tabla 13: Matriz de correlación de ICA_{MC} para las distintas fechas de estudio

	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.433	1.000		
13/7/2015	0.392	0.326	1.000	
2/11/2015	0.467	0.538	0.384	1.000

Se evalúan además los promedios obtenidos para cada celda según las fechas de estudio, para determinar si el índice generado esencialmente produce información distinta para cada fecha, lo cual puede limitar su generalización. Para esto se realiza un análisis de varianza, resultando en una diferencia significativa entre las medias evaluadas, para un valor- $p < 0.05$, para las condiciones $[F(3, 4388) = 80.454, p = 3.775E-161]$, como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14: ANOVA de valores de ICA_{MC} para las distintas fechas de estudio

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	241.363	3	80.454	270.603	3.775E-161	2.607
Dentro de los grupos	1304.618	4388	0.297			
Total	1545.981	4391				

Con la estadística resultante se pudo concluir que este acercamiento metodológico para la determinación de un índice de calidad ambiental urbano presenta algunas falencias, entre las cuales se encuentra principalmente la falta de representatividad para describir ambientalmente el comportamiento de la ciudad. Considerando que desde un principio los rangos de clasificación se ven limitados a la reclasificación previa que se realice de los indicadores participantes, el índice final puede contener un sesgo de información según las reglas que se apliquen para establecer la misma.

En la Figura 14, se puede distinguir claramente una influencia marcada los indicadores generados a partir de imágenes satelitales en el índice generado, pues según su reclasificación (Anexo 7), las peores condiciones se presentan en aquellas imágenes

correspondientes a épocas lluviosas, mientras que épocas secas presentan mejorías, especialmente hacia la periferia de las imágenes.

Se observa en general una calidad ambiental *deficiente* hacia el centro de la ciudad, mientras que hacia la periferia, según el mes del año será *regular* (octubre-noviembre) o *bueno* (julio). Sectores como el centro histórico, feria libre y el aeropuerto para todas las fechas de análisis, presentan una calidad ambiental *deficiente*, mientras que sectores como el Parque Industrial, sitio caracterizado por su alta actividad industrial y por tanto, su alta contaminación, presenta calidades entre *deficientes* (época lluviosa) y *regulares* (época seca); lo mismo sucede con las áreas verdes (Paraíso, Inclusivo, Lagunas de Oxigenación), que en época seca presentan condiciones de calidad ambiental *buenas* que para época lluviosa se convierten en *regulares*.

Esto difiere en general del uso de suelo de la ciudad y no se acopla completamente a la realidad urbana. La principal causa para estas notables incongruencias puede ser la falta de pesos diferenciados para cada uno de los indicadores que construyen el índice. Para otorgar un porcentaje de influencia a un indicador se pueden aplicar diversos métodos, ya sean estadísticos, o en algunos casos alegando a juicios de valor de expertos en el tema y/o a través de encuestas a habitantes del área de estudio que permitan conocer la importancia que una variable presenta sobre otra (OECD, 2008). De esa forma, indicadores con altas correlaciones podrán recibir pesos diferenciados de manera que la redundancia de información se vea minimizada y que el índice adquiera una mayor representatividad.

En la presente investigación, sin embargo, se opta por aplicar pesos equitativos, ya que el tiempo para poder determinar pesos con estas metodologías son extensos y requieren de una mayor cantidad de recursos humanos y materiales; por este motivo, se aplicó la metodología del análisis de componentes principales, el cual se convierte en una técnica estadística para la asignación de puntajes para cada uno de los indicadores que conforman el índice, cuyos resultados se describen en la siguiente sección.

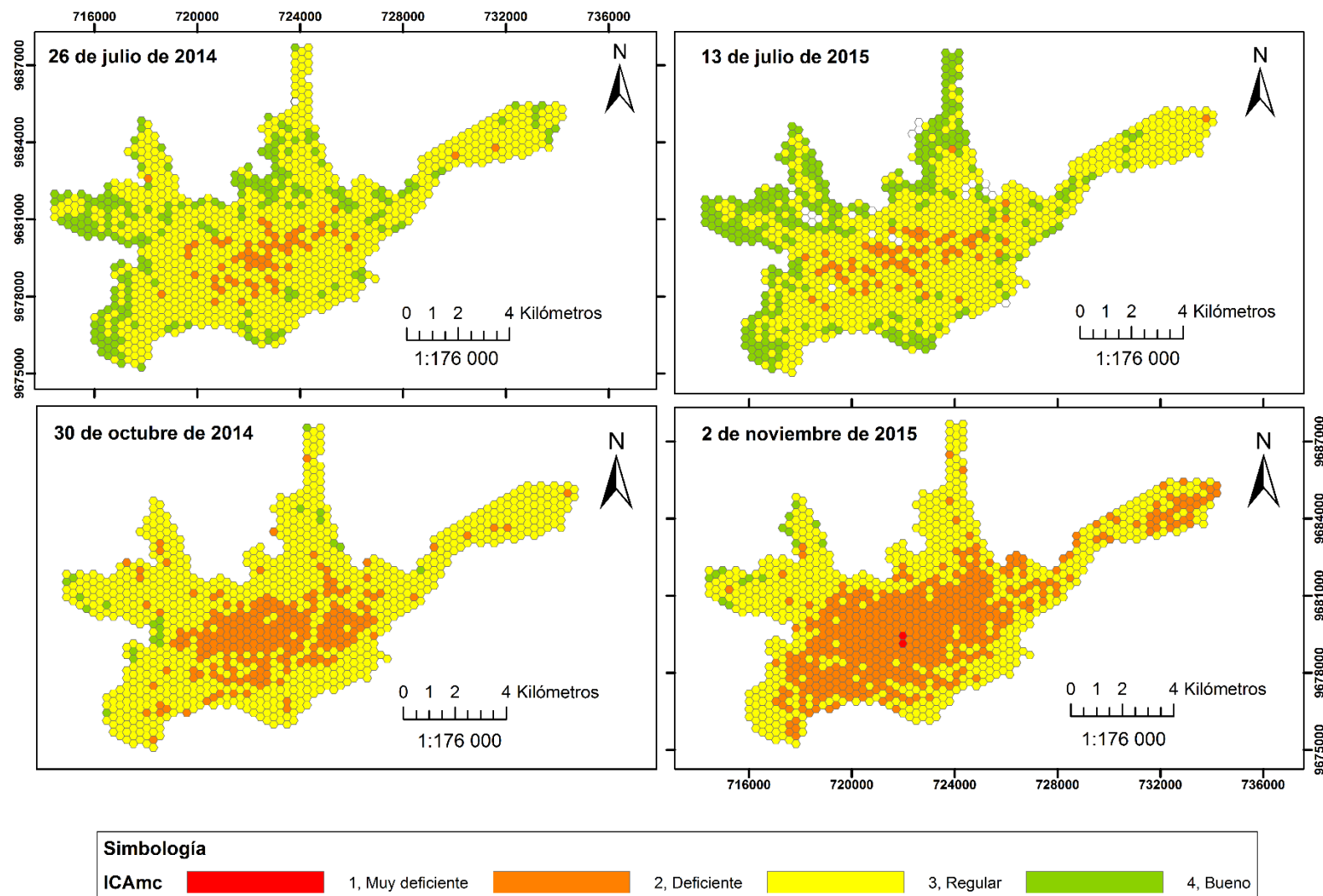


Figura 14: Representación espacial de ICA_{Mc} para las distintas fechas de estudio

4.2.2. Análisis de ICA urbano a partir de análisis de componentes principales

Una vez aplicados los distintos algoritmos y metodologías para generar las capas vectoriales de información correspondiente a los indicadores, se realizó un análisis de normalidad de los mismos, analizando los valores fuera de rango u *outliers* en cada uno de los conjuntos de variables generadas para cada imagen a través de diagramas de caja (Anexo 8).

Como resultado se obtuvieron algunos puntos fuera de rango, los cuales fueron removidos para realizar las pruebas de ACP, determinando que la presencia de *outliers* no impacta significativamente en la determinación del índice por lo cual se decidió mantener esta información, de manera que no existan vacíos de información elevados al momento de graficar los valores del ICA dentro de la malla hexagonal. En el Anexo 9 se observa el análisis de *outliers* realizado para la imagen del 2 de noviembre de 2015, ya que es la imagen que presenta la mayor cantidad de valores fuera de rango para las variables analizadas.

Habiendo comprobado que la presencia de *outliers* no genera cambios significativos, se comprobó la viabilidad del análisis de componentes principales al obtener el índice KMO. Al presentar las cuatro fechas de análisis valores de KMO mayores a 0.7, como se observa en la Tabla 15, se puede realizar el análisis respectivo. Se generaron además valores individuales de KMO, observando que la mayoría presentan valores superiores al límite establecido, a excepción del ozono y el ruido en las imágenes de julio 2014 y 2015, pero que al no afectar el índice global, no requiere de la eliminación de las variables.

A continuación, se generaron los índices de calidad ambiental urbana para las fechas de estudio, correspondientes a las calificaciones del primer componente principal retenido. La varianza retenida por este componente principal osciló entre 56.5% a 67.2% con auto-valores entre 4.52 y 5.38, conteniendo de esta manera un alto porcentaje de la información correspondiente a la matriz inicial de datos.

A manera general se puede observar que para las cuatro fechas de análisis, los pesos o *loadings* del primer componente retenido indican que cuando los indicadores de vegetación sean elevados, es decir presenten vegetación densa y humedades altas, y los valores de área construida, temperatura del suelo y concentraciones de dióxido de carbono sean mínimos, el índice de calidad ambiental generado será positivo, indicando una calidad ambiental muy *buena*; aplicándose la misma lógica para el caso contrario donde se obtenga una calidad ambiental *muy deficiente*, traducándose en altas temperaturas del suelo, mayor área construida, y mayores concentraciones de dióxido de carbono junto con suelo desnudo y humedades mínimas.

Para el caso de las variables de ozono y ruido, se puede observar que sus pesos no son tan significativos como el resto de indicadores, a pesar de que se tome 0.3 como significativo para este tipo de análisis. Sin embargo, estos datos no siguen una tendencia definida, dificultando su interpretación dentro del índice generado. Aun así, se decidió mantenerlos ya que son importantes dentro de las variables de interés para la generación del índice.

La comunalidad, o cantidad de varianza que cada indicador comparte con los demás, es elevada principalmente para aquellos indicadores referentes a espacios verdes y su indicador inversamente proporcional, el NSI. Para el caso de temperatura y dióxido de nitrógeno, la comunalidad varía según la fecha de análisis manteniéndose en valores medios que aún pueden considerarse como significativos. Sin embargo, las variables de ozono y ruido, presentan valores bajos.

En el Anexo 10 se pueden analizar los gráficos de sedimentación, visualizando claramente que el primer componente comprende la mayor cantidad de varianza como se dijo anteriormente según los diagramas de sedimentación, presentando un codo entre el segundo y tercer componente. No obstante, como se explicó en la metodología, para mantener uniformidad en el estudio se retuvo únicamente el primer componente principal.

En el mismo anexo se presentan además las representaciones bi-espaciales de los dos primeros componentes, en donde se observa una tendencia aparente de las celdas de análisis correspondientes a la malla hexagonal hacia situaciones de calidad ambiental deteriorados, en donde prevalecen valores elevados de área construida, temperatura del suelo y dióxido de nitrógeno, y valores bajos para los indicadores de vegetación.

En estos gráficos también se pueden analizar las tendencias de las variables de ruido y ozono, las cuales para algunas fechas (julio y noviembre de 2015) presentan una tendencia positiva hacia el componente dos, sin embargo, no es una tendencia que se mantiene para las cuatro fechas siendo una razón adicional para la no inclusión del segundo componente dentro del índice de calidad ambiental generado.

Tabla 15: Resultados del ACP para las cuatro imágenes satelitales analizadas

Variable	ICA-26Jul14			ICA-30Oct14			ICA-13Jul15			ICA-02Nov15		
	Peso CP1	Comunalidad	KMO individual	Peso CP1	Comunalidad	KMO individual	Peso CP1	Comunalidad	KMO individual	Peso CP1	Comunalidad	KMO individual
NDVI	0.951	0.9	0.81	0.953	0.91	0.82	0.956	0.91	0.76	0.929	0.862	0.8
TSAVI	0.874	0.76	0.64	0.923	0.85	0.71	0.956	0.91	0.75	0.923	0.852	0.73
LWCI	0.958	0.92	0.74	0.949	0.9	0.71	0.959	0.92	0.88	0.937	0.877	0.73
NSI	-0.943	0.89	0.79	-0.944	0.89	0.72	-0.938	0.88	0.87	-0.922	0.849	0.72
TEMP	-0.795	0.63	0.77	-0.85	0.72	0.284	-0.489	0.24	0.77	-0.782	0.611	0.84
NO2	-0.85	0.72	0.8	-0.734	0.54	0.87	-0.764	0.58	0.93	-0.781	0.61	0.93
O3	0.584	0.34	0.7	0.671	0.45	0.87	-0.01	<0.001	0.45	-0.439	0.192	0.76
RUIDO	-0.323	0.1	0.53	-0.334	0.11	0.76	-0.269	0.072	0.56	-0.292	0.085	0.72
Auto-valor	5.2759			5.3775			4.5218			4.9396		
% Varianza	65.9			67.2			56.5			61.7		
KMO general	0.75			0.77			0.8			0.77		

Para analizar los índices generados a partir de las cuatro fechas de análisis se aplicó una matriz de correlación (Tabla 16), de manera que se pudieron realizar análisis espaciales y temporales. Sin embargo, se observan altas correlaciones para todas las fechas de estudio, indicando que en realidad el índice generado podría generalizarse para el área de estudio, considerando que no existen diferencias sustanciales tanto con el paso de los años, como con épocas secas o lluviosas.

Tabla 16: Matriz de correlación de ICA_{CP} para las distintas fechas de estudio

	26/7/2014	30/10/2014	13/7/2015	2/11/2015
26/7/2014	1.000			
30/10/2014	0.966	1.000		
13/7/2015	0.961	0.949	1.000	
2/11/2015	0.950	0.959	0.942	1.000

Para comprobar que en realidad los índices obtenidos no presentan diferencias sustanciales se corrió un análisis de varianza (Tabla 17), cuyos resultados demuestran que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los índices para las distintas fechas, para un valor- $p < 0.05$, para las condiciones $[F(3, 4388) = 1.515E-12, p = 1]$.

Tabla 17: ANOVA de calificaciones de ICA_{CP} para las distintas fechas de estudio

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4.547E-12	3	1.515E-12	1.515E-12	1	2.607
Dentro de los grupos	4388	4388	1			
Total	4388	4391				

De este análisis, por tanto, se puede establecer que esta metodología es aplicable para la ciudad de Cuenca, sin importar la época del año en la que se realice, y sintetizando indicadores altamente correlacionados en un índice ortogonal que representa la mayor cantidad de información referente a la calidad ambiental de la ciudad.

Las calificaciones o *scores* constituyen los índices de calidad ambiental generados, obteniendo valores estandarizados, con media cero y desviación estándar de uno, los cuales son fácilmente clasificados, según la Tabla 10, en donde se considera que alrededor del 10%

de los valores más altos tendrán un índice de calidad ambiental *muy bueno*, mientras que alrededor del 10% de los valores ambientales más bajos tendrán un ICA *muy deficiente*, basado en la curva de normalidad que sigue el índice generado. Las categorías *buenas* y *deficientes* comprenden alrededor del 25% de los datos restantes, siendo el 30% final para la categoría *regular*. Esta categorización sigue las pautas recomendadas por la OECD (2008).

Finalmente se generan los mapas del índice de calidad ambiental a partir del análisis de componentes principales, los cuales se pueden observar en la Figura 15. A simple vista se puede comprobar que la periferia de la ciudad presenta en promedio índices de calidad entre *buenos* (26.7%) y *muy buenos* (6.5%), mientras que los sectores céntricos correspondientes al Centro Histórico, Feria Libre y el Parque Industrial presentan un ICA *muy deficiente* (6.6%), así como áreas residenciales con un ICA deficiente (26.7%), restando un 33.5% del área de estudio con un ICA *regular*.

Las zonas periféricas que gozan de las mejores categorías para el ICA_{CP} corresponden a sectores como Ricaurte, El Cebollar, Balzay, Baños, Turi, El Valle, entre otros, hacia las cuales se ha observado un crecimiento urbano con la construcción de villas y edificios multifamiliares que podrían poner en riesgo la calidad ambiental de la zona.

Se puede observar además el efecto de los parques urbanos sobre el ICA generado, ya que, por ejemplo, el sector del Parque Paraíso y Ucubamba (zona donde se encuentran las lagunas de tratamiento de aguas residuales), presentan valores entre *bueno* y *muy bueno* dentro de la malla hexagonal. De igual manera se observa que los parques lineales correspondientes a los ríos Tomebamba, Yanuncay y Tarqui actúan como una zona de amortiguamiento entre zonas de amplio deterioro ambiental, mejorando visiblemente la calidad ambiental, dentro de aquellos sectores donde el tráfico vehicular y las edificaciones generan deterioro.

Como ya se verificó con el análisis de correlación, no se comprueban tendencias estacionales en el área de estudio, sin embargo, los patrones espaciales generados podrían agruparse por años, siendo estos bastante similares para el año 2014 y 2015 respectivamente, considerando una mayor cantidad de celdas en estado *muy deficiente* y una menor cantidad de celdas en estado *muy bueno*, para el año 2015 (7.4% y 5.9% respectivamente) que para el año 2014 (6.4% y 6.6% respectivamente), lo que sugiere que la calidad ambiental se encuentra en un proceso de detrimento a través de los años.

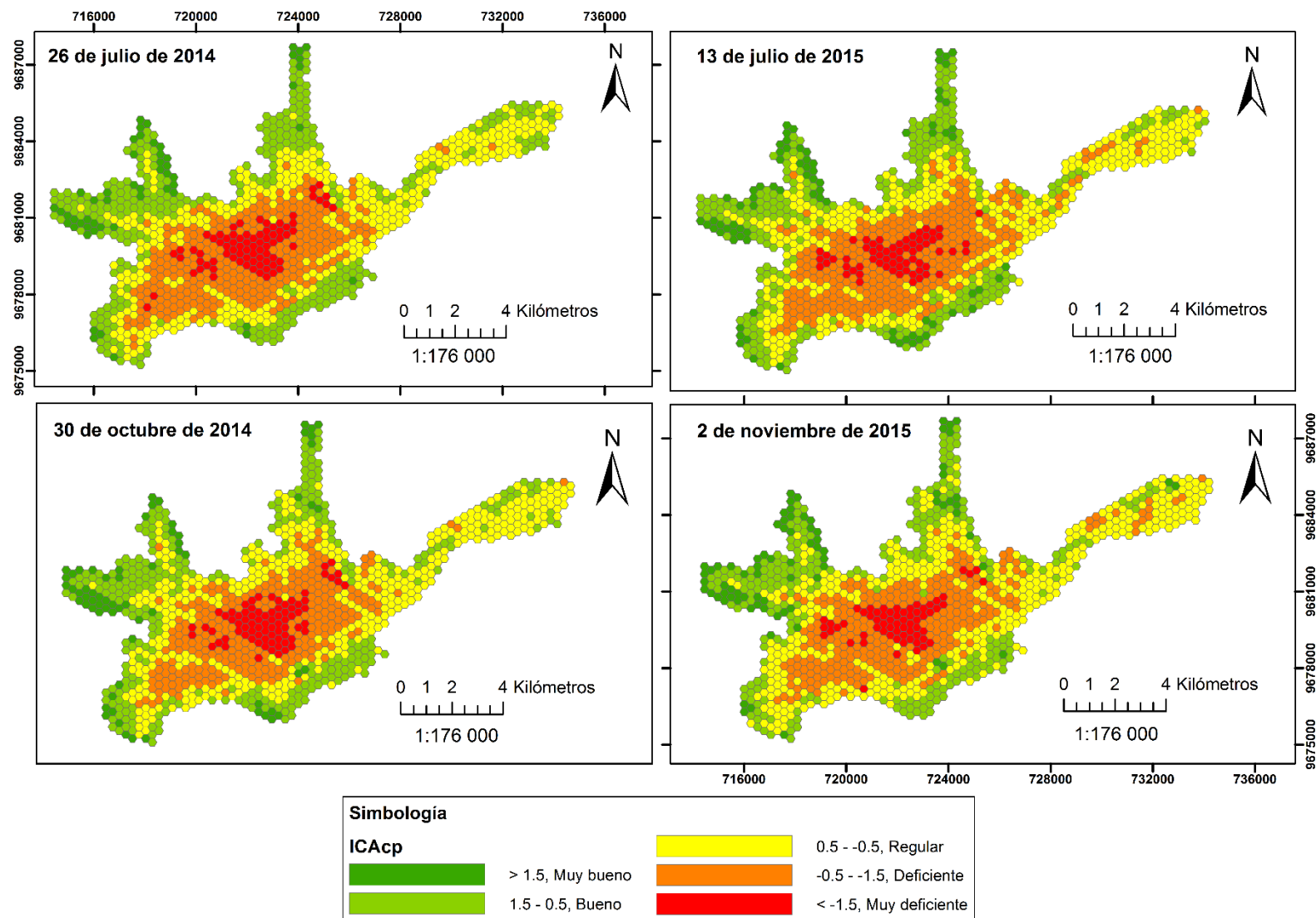


Figura 15: Representación espacial de ICA_{CP} para las distintas fechas de estudio

4.3. Comparación entre índices de calidad ambiental urbanos generados

Como se mencionó en las secciones previas, el método de análisis multicriterio aporta una baja explicación de la realidad del área de estudio, mientras que el análisis de componentes principales permite generar una visión de la calidad del aire, congruente con el uso de suelo de la zona así como de la realidad que se aprecia por los habitantes de la misma.

A más de esto, el índice a partir del análisis multicriterio presenta incongruencias respecto a los meses de estudio en los cuales se realizó su respectivo análisis, mientras que para el caso del índice a partir de ACP, se mantiene una tendencia que permite generalizar el índice para el área de estudio, manteniéndose similar en época seca o lluviosa y mostrando una estabilidad con el paso del tiempo.

De los valores del índice de calidad ambiental obtenidos por los dos métodos y para cada celda se puede hacer una comparación de la relación que guardan entre cada una de las fechas correspondientes, obteniendo una matriz de correlación como se observa en la Tabla 18. En esta se puede comprobar que los índices generados no guardan una relación alta a excepción de las fechas de octubre 2014 y noviembre 2015, con valores de 0.548 y 0.648 respectivamente. Se deduce por tanto que los índices miden distintas realidades del área de estudio.

Tabla 18: Matriz de correlación entre índices de calidad ambiental para cada fecha de estudio

		ICA _{CP}			
		Julio 2014	Octubre 2014	Julio 2015	Noviembre 2015
ICA _{MC}	Julio 2014	0.439			
	Octubre 2014		0.548		
	Julio 2015			0.445	
	Noviembre 2015				0.648

Se analizó además de manera cuantitativa, el estado general de la calidad ambiental referente a cada uno de los índices calculados. Los gráficos de barras presentados en la Figura 16 demuestran que el índice de calidad ambiental urbano generado a partir del análisis de componentes principales – ICA_{CP}, abarca las cinco categorías establecidas para la evaluación del índice, mientras que el índice sintético compuesto generado a partir de análisis multicriterio – ICA_{MC} ilustra principalmente tres categorías que no permiten hacer una evaluación profunda de la realidad ambiental de la zona.

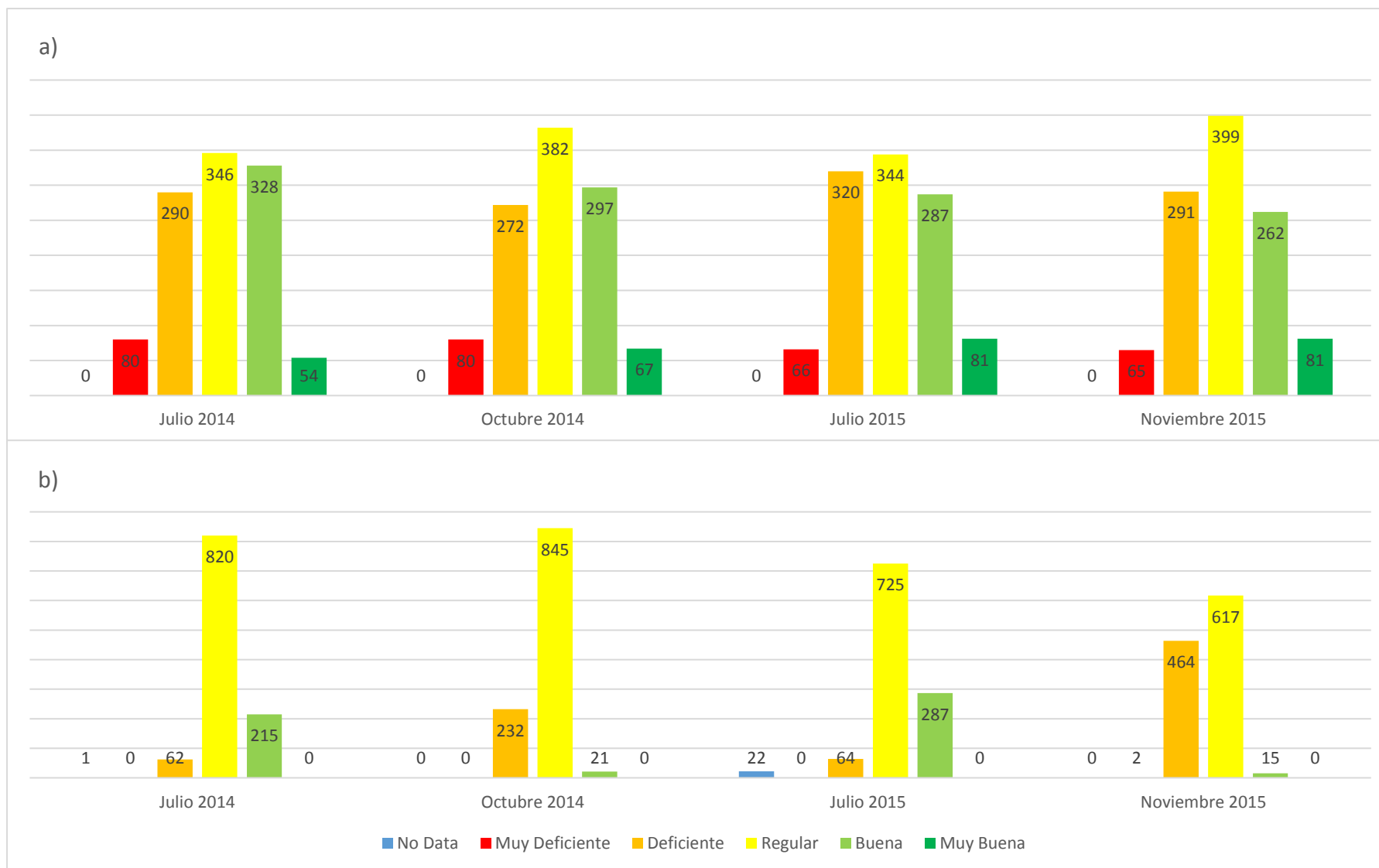


Figura 16: Comparación cuantitativa de la calidad ambiental de cada celda de la malla hexagonal. a) ICA_{CP} b) ICA_{Mc}

Para el caso del ICA_{CP} se observa que la cantidad de celdas dentro de la malla hexagonal correspondientes a un estado *muy deficiente* disminuyen del año 2014 al año 2015 en un 1.3%, notándose el respectivo aumento de celdas con un estado *muy bueno* de calidad ambiental de julio de 2014 hasta noviembre de 2015 de 2.5%. Por su parte las celdas correspondientes a categorías *deficientes* y *regulares* aumentan para los meses de octubre y noviembre correspondientes a épocas secas, mientras que la categoría *bueno* presenta una disminución de julio de 2014 a noviembre del 2015 de un 6%. Cabe recalcar que no existen celdas vacías en este análisis ya que aquellos pixeles donde no se tengan datos dentro del ACP son complementados con datos de contaminantes atmosféricos y ruido.

Por otro lado, el ICA_{MC} presenta celdas sin información para las imágenes correspondientes a los meses de julio las cuales presentan nubosidad. Además, se observan tendencias respecto a las celdas de categoría *bueno* las cuales aumentan en época seca del 2014 al 2015 en un 6.6% y la categoría *deficiente* con el mismo comportamiento para la época lluviosa en un 21.1%. La categoría *regular* es la predominante en este índice aumentando de julio a octubre de 2014 en un 2.28%, y disminuyendo de octubre de 2014 hasta noviembre de 2015 en un 18.5%. Para este ICA no se registran celdas con categoría *muy buena* y existen únicamente dos celdas con categoría *muy deficiente* para la imagen del 2 de noviembre de 2015.

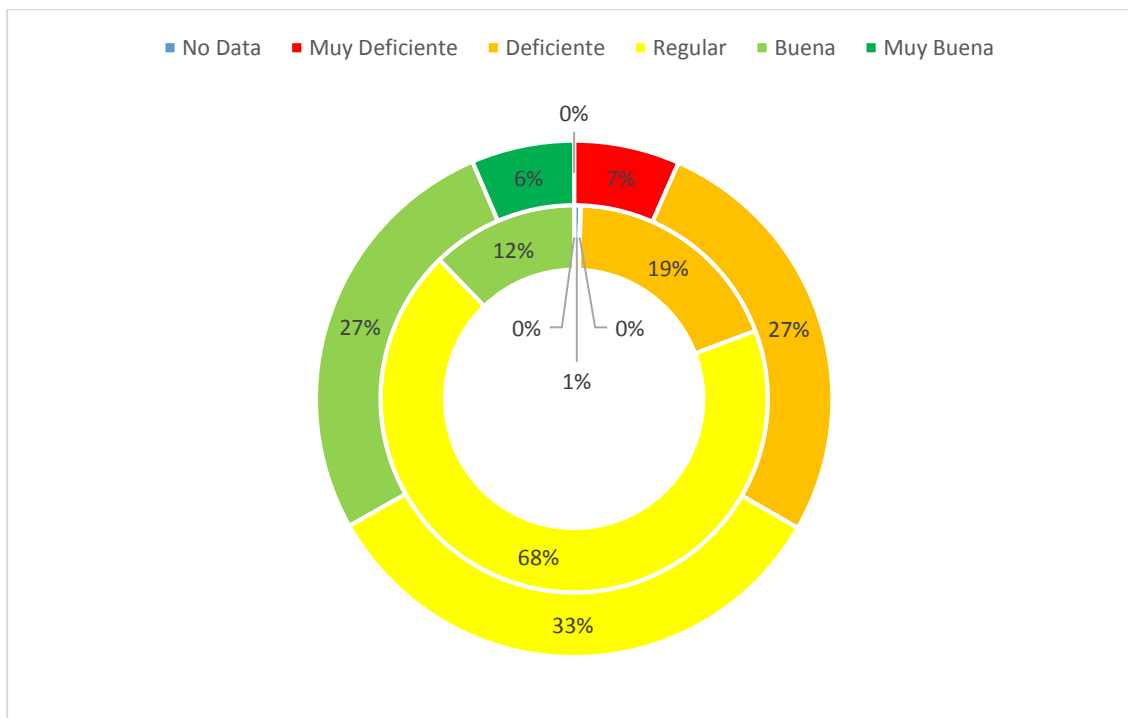


Figura 17: Comparación de promedios por categoría de ICA para cada índice generado

Analizando en promedio la cantidad de celdas por categoría para cada índice generado, resumido en la Figura 17, se muestra que para el ICA_{CP} , ilustrado en el anillo externo, un 7% del área de estudio correspondiente a 567.5 ha presentan una calidad ambiental *muy deficiente*, un 27% (2287.4 ha) una calidad *deficiente*, 33% (2868.5 ha) una calidad *regular*, 27% (2289.3 ha) una calidad *buena* y 6% (551.9 ha) una calidad *muy buena*. Mientras que el ICA_{MC} , presenta un 1% con celdas sin datos, correspondiente a 44.9 ha, así como 0.05% (3.9 ha) de celdas con categoría *muy deficiente*. Un 19% (205.5 ha) corresponde a celdas con calidad *deficiente*, 68% (751.57 ha) a una calidad *regular* y 12% (134.5 ha) a una calidad *buena*.

Como se puede observar, el ICA_{CP} representa con un mayor detalle las variaciones espaciales en el área de estudio, diferenciando zonas según su calidad ambiental de una manera más fina, justamente por los pesos que se le otorga al realizar el análisis de componentes principales, a diferencia del ICA_{MC} , el cual, con pesos equitativos, no permite evaluar de manera íntegra la realidad del área de estudio.

A diferencia de la investigación realizada por Nichol y Wong (2009), en la que se aplican las mismas metodologías que en este estudio para la construcción del índice, y donde se concluye que el análisis multicriterio es la mejor alternativa frente al análisis de componentes principales en su área de estudio, en el análisis realizado se determina al ACP como la mejor metodología. Es importante tomar en cuenta que las técnicas de asignación de pesos llevada a cabo en la investigación mencionada es un factor preponderante en la conclusión alcanzada, ya que la misma evita redundancias de información dentro del índice generado, así como una visión global de las variables en función de la percepción de los habitantes y del criterio de expertos. Por lo tanto, no valdría la pena descartar esta metodología en la ciudad, siempre y cuando la influencia de cada indicador sea debidamente asignada en un análisis más profundo que el alcance de esta investigación.

El ACP es una metodología probada por Gunawan et al. (2007) y Santana et al. (2010), quienes al igual que en la presente investigación, pueden relacionar los índices generados con el uso de suelo de sus áreas de estudio, validando la metodología para su uso con información derivada de satélite, y otorgando pesos de manera objetiva a través de análisis estadísticos, que evitan en cierta medida el sesgo que pueda introducirse por parte del investigador.

5. Conclusiones

- i. En cuanto a la comparación de indicadores ambientales generados, los resultados son consistentes al mostrar que los indicadores NDVI, TSAVI y LWCI tienen una correlación significativa y positiva con los sectores y áreas especiales donde existe alta proporción de vegetación; en tanto que NSI y TS, presentan una correlación positiva con las áreas que tienen mayor proporción de área construida y vías.
- ii. El ruido y el ozono presentan una correlación no significativa con el resto de indicadores ambientales, debido a que su variabilidad espacial y temporal está arraigada a un conjunto de factores de interferencia y diferentes formas de percepción de los mismos dentro del entorno urbano.
- iii. El uso de dos metodologías ha permitido identificar al análisis de componentes principales como la técnica más apropiada para la construcción del índice de calidad ambiental, considerando que el análisis multicriterio usado en el índice sintético compuesto carece de representatividad para el área de estudio, presentando incongruencias importantes con la realidad ambiental de la zona.
- iv. La asignación equitativa de pesos en el caso del análisis multicriterio para los indicadores analizados dentro de la elaboración del índice introduce un sesgo a la información generada, especialmente por la reclasificación inicial que se establece a partir de revisiones bibliográficas y criterios del autor, lo cual resulta en un índice que varía temporalmente de manera exagerada según los datos de ingreso, y que difícilmente puede generalizarse.
- v. Una vez seleccionada la metodología idónea para la construcción del índice de calidad ambiental para la ciudad se concluye que las condiciones de calidad ambiental en Cuenca son heterogéneas, y se ha logrado representar en el espacio geográfico el valor que tiene cada unidad experimental (celda hexagonal), determinando finalmente zonas que comparten valores del índice de calidad ambiental similares y que pueden ser clasificadas como relativamente homogéneas de acuerdo al índice estimado.
- vi. Dentro de la urbe de Cuenca se observa sectores típicos, con alta actividad comercial e industrial, como el Centro Histórico, Feria Libre, el Parque Industrial, donde se aprecia claramente el efecto de las interacciones entre los factores ambientales estudiados, que determinan gran parte de la calidad ambiental, siendo sectores propensos a mayor concentración de NO_2 , mayor área construida, reducción de área verde, islas de calor y niveles elevados de presión sonora.



- vii. De igual manera se observa una mejora de la calidad ambiental hacia áreas periféricas de la ciudad, correspondiendo a zonas de vegetación densa, a las cuales se suman los parques dentro de la ciudad de Cuenca como áreas verdes de mitigación de efectos nocivos de la contaminación ambiental, así como parques lineales los cuales funcionan como zonas de amortiguamiento ante sectores con alta densidad de edificaciones, concentraciones de gases atmosféricos contaminantes, altas temperaturas del suelo entre otros factores.
- viii. No existe una variación estacional para el índice generado, ya que su comportamiento se mantiene constante tanto en época seca como lluviosa, pudiendo generalizarse para la ciudad de Cuenca, sin importar el momento del año en el que se determine.
- ix. La importancia operativa de estos resultados indican que se ha construido un importante instrumento para la definición de política pública en materia de medio ambiente urbano, con la cual se puede diferenciar espacialmente el grado de intervención pública en las diversas zonas y establecer criterios de prioridad en la asignación de recursos.
- x. El índice de calidad ambiental, a este nivel de agregación, es un poderoso instrumento que ha permitido resumir una gran cantidad de datos en un solo índice que sintetiza la mayor parte de la información contenida en las variables que determinan la calidad ambiental en las zonas urbanas.

6. Recomendaciones

- i. Complementar el índice de calidad ambiental, incorporando otros indicadores obtenidos de mediciones directas o datos estadísticos del área de estudio (residuos sólidos, material particulado, densidad de tráfico, densidad de habitantes, calidad de agua, entre otros).
- ii. Establecer un sistema de asignación de pesos para la metodología referente al análisis multicriterio que se base en el criterio de expertos y en encuestas aplicadas a habitantes de distintos sectores del área de estudio, que permitan evitar el sesgo de información generado por la reclasificación, así como la influencia de los datos extraídos de imágenes satelitales con correlaciones altas positivas y negativas entre sí.
- iii. Elaborar el índice de calidad ambiental urbano para la ciudad, utilizando imágenes provenientes del satélite Sentinel-2A, para estudiar cómo influye la resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral en la consistencia del índice respecto a las imágenes provenientes del satélite Landsat 8.
- iv. Contar con una línea base que sirva de referencia a otros investigadores para proponer una metodología estratégica que permita disminuir el impacto ambiental en las zonas urbanas más afectadas de la ciudad y que sea evaluada mediante patrones espaciales a futuro, para validar la eficacia de la misma.

7. Referencias

- Aguirre, M. (2009). Los sistemas de indicadores ambientales y su papel en la información e integración del medio ambiente. In *Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente* (pp. 1231–1256). Recuperado de http://www.ciccp.es/webantigua/icitema/Comunicaciones/Tomo_II/T2p1231.pdf
- Alcaldía de Cuenca, & Red de Monitoreo EMOV EP. (2014). *Informe de Calidad del Aire, año 2013*. Cuenca, Ecuador.
- Alvarez, C. I., & Padilla, O. (2014). Estimación de Contaminación del Aire por PM10 en Quito Determinado por Índices Ambientales obtenidos con Imágenes Satelitales LANSAT ETM+, 1–11.
- Ángel, L., Ramirez, A., & Dominguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 34(131), 173–183.
- Arjmand, R. (2016). *Public Urban Space, Gender and Segregation: Women-only urban parks in Iran*. Taylor & Francis. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=ttNRDQAAQBAJ>
- Beavers, A. S., Lounsbury, J. W., Richards, J. K., Huck, S. W., Skolits, G. J., & Esquivel, S. L. (2013). Educational Research. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 18(6).
- Biasioli, M., Grcman, H., Kralj, T., Madrid, F., Díaz-Barrientos, E., & Ajmone-Marsan, F. (2007). Potentially toxic elements contamination in urban soils: a comparison of three European cities. *Journal of Environmental Quality*, 36(1), 70–79. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0254>
- Birch, C. P. D., Oom, S. P., & Beecham, J. A. (2007). Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological Modelling*, 206(3–4), 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041>
- Borderías, M., & Marín, E. (2006). *Medio Ambiente Urbano*. Madrid: UNED. UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION A DISTANCIA.
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *Lancet*, 360(9341), 1233–1242. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
- Carlson, T., & Ripley, D. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)



- Choudhury, B. ., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., & Daughtry, C. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by made simulation. *Remote Sensing of Environment*, 50, 1–17.
- Chuvieco, E. (2007). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel.
- Congedo, L., & Munafò, M. (2012). Development of a Methodology for Land Cover Classification in Dar es Salaam using Landsat Imagery, (January 2012), 48. Recuperado de <http://www.planning4adaptation.eu/>
- Cordero, X. (2014). *Microclima y confort térmico urbano: análisis sobre la influencia de la morfología del cañón urbano caso de estudio en los barrios el Raval y Gracia, Barcelona*. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA. Recuperado de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23637/XimenaCordero_TFM.pdf
- Correa, E., Flores, S., & Lesino, G. (2003). Isla de Calor Urbana: Efecto de los Pavimentos. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 7(2), 1–6. <https://doi.org/ISSN0329-5184>
- Cuadrat, J., Serrano, V., & Sánchez, M. (2005). Efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de La A.G.E.N.*, 40, 311–327.
- de Smith, M. J., Goodchild, M. F., & Longley, P. A. (2009). *Geospatial Analysis - A comprehensive guide*. www.spatialanalysisonline.com.
- Delgado, O., & Martínez, J. (2015). Elaboración del mapa de ruido del área urbana de la Ciudad de Cuenca – Ecuador , empleando la técnica de interpolación geoestadística Kriging ordinario. *Ciencias Espaciales*, 8, 411–440. Recuperado de <http://www.lamjol.info/index.php/CE/article/view/2059/1854>
- Díaz, G. (2005). Vegetación y Calidad Ambiental de las Ciudades. *Arquitectura Y Urbanismo*, 26(1), 44–49.
- Doygun, H., & Ku\csat Gurun, D. (2008). Analysing and mapping spatial and temporal dynamics of urban traffic noise pollution: a case study in Kahramanmara{\c{s}}, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 142(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9908-7>
- EPA. (2002). *Environmental indicators initiative*.
- Escobar, L. (2006). Indicadores sinteticos de calidad ambiental: un modelo general para

grandes zonas urbanas, XXXII, 73–98.

- Escobedo, F. J., & Nowak, D. J. (2009). Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 90(3–4), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.021>
- Estévez, J. (1977). La Construcción de un Índice Cuantitativo sobre Educación Superior Utilizando la Técnica de Análisis de Componentes Principales. *Construcción de Un Índice*, 137–153.
- European Environmental Agency. (2002). *Towards an urban atlas: Assessment of spatial data on 25 European cities and urban areas. Environmental Issue Report* (Vol. 30). Copenhagen: European Environment Agency.
- Galán, D., & Fernandez, R. (2006). IMPLICATION OF THE NO_x IN THE ATMOSPHERIC CHEMISTRY. *Revista Electrónica de Medioambiente UCM.*, (X), 98.
- Gómez, Lady, & Castañeda, C. (2013). Estudio del Crecimiento Urbano con respecto al Efecto Isla de Calor para establecer Lineamientos de Gestión Energético Ambiental en Bogotá. *Eleventh Latin American and Caribbean for Engineering and Technology*, 1–10.
- Guillén, V., & Orellana, D. (2016). Un acercamiento a caracterizar la isla de calor en Cuenca, Ecuador, (December), 1–14.
- Gunawan, O., Armitage, R. P., & James, P. (2007). An Urban Environmental Quality index for Salford , Greater Manchester :
- Guzmán, M. H. F. ., & Ochoa, J. M. (2014). Confort Térmico en los Espacios Públicos Urbanos Clima cálido y frío semi-seco. *Revista Hábitat Sustentable*, 4(2), 52–63.
- Hunt, E., Rock, B., & Nobel, P. (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22.
- INEC. (2010). Información Censal.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2015). Anuario Meteorológico Nro 52-2012. *Serviciometeorologico.Gob.Ec*, 134. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am 2012.pdf>
- Jasarevic, T., Thomas, G., & Osseiran, N. (2014). 7 million premature deaths annually linked to air pollution. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>

- Jiménez, J. C., Sobrino, J. A., Cristóbal, J., Sòria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2010). Obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la serie histórica LANDSAT. *Teledetección Y Desarrollo Regional*, 53–63.
- Knight, E., & Kvaran, G. (2014). Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance. *Remote Sensing*, 6(11), 10286–10305. <https://doi.org/10.3390/rs61110286>
- LANDSAT PROJECT SCIENCE OFFICE. (2013). Landsat 8 science data user's handbook.
- Leva, G. (2005). Indicadores de Calidad de Vida Urbana. *Hábitat-Metrópolis*.
- Li, F., Jackson, T., Kustas, J., Schmugge, T., French, A., & Cosh, M. (2004). Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX. *Remote Sensing of Environment*, 92, 521–534.
- Lombi, E., Zhao, F., Dunham, S., & McGrath, S. (2001). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 1919–1926.
- Manrique, E. (1999). *Índice de vegetación aplicación del NDVI*. Albacete.
- Martínez, J. (2002). Ciudades de Chile, Migración interna y redistribución de la Población: algunas evidencias del período 1987-1992. *Revista de Geografía Norte Grande*, 29, 19.
- Mendez, M. (2003). *Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos*. Santiago.
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación. *Unasyva*, 62(238), 39–46. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/015/i2560s/i2560s07.pdf>
- Ministerio del Ambiente. Libro VI Anexo 4 De la Calidad del Aire Ambiente (2004). Quito: Texto Unificado de Legislación Secundaria.
- Ministerio del Ambiente. Libro VI Anexo 5 De la Calidad Ambiental (2012). Quito: Texto Unificado de Legislación Secundaria.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J., Pardo, A., & Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ing. USBMed*, 3(1), 62–68.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2005). *Handbook on Constructing Composite Indicators*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/533411815016>

- Nichol, J., & Wong, M. S. (2005). Modeling urban environmental quality in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 73, 10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.004>
- Nichol, J., & Wong, M. S. (2009). Mapping urban environmental quality using satellite data and multiple parameters. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(1), 170–185. <https://doi.org/10.1068/b34034>
- Niño, L. (2008). Uso de la función semivariograma y estimación kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Biomedica*, 28(4), 578–586. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v28i4.64>
- OECD. (1993). Environmental indicators for environmental performance review.
- OECD. (2008). *Handbook on constructing composite indicators. OECD Statistics Working Papers*. <https://doi.org/10.1787/533411815016>
- OMS. (2005). *Disponibilidad de áreas verdes*. Chile.
- OMS. (2015). *La OMS pone de relieve la grave amenaza de la exposición al ruido recreativo*. Ginebra.
- OMS. (2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud.
- OSHA. Monitoring noise levels non-mandatory informational appendix, Occupational Safety and Health Administration (1996). Occupational Safety and Health Standards. Recuperado de https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=INTERPRETATIONS&p_id=20631
- Paredes, F. J. (2016). Variabilidad de la Vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica. *Novum Scientiarum*, (November). Recuperado de <http://www.ecoambienteydesarrollo.org/revista/ojs/index.php/novum/article/view/109>
- Pender, A., Dunne, L., Dilworth, C., Doddy, M., Fennelly, R., Kealy, L., ... Scully, F. (2000). Environmental Indicators for the Urban Environment, 0–37.
- Platzer, L., Iñiguez C, R., Cevo, J., Ayala, F., & Resumen, R. 3. (2007). Medición de los niveles de ruido ambiental en la ciudad de Santiago de Chile Environmental noise levels measurement of the city of Santiago, Chile. *Rev. Otorrinolaringol. Cir. Cabeza Cuello*, 67, 122–128. <https://doi.org/10.4067/S0718-48162007000200005>
- Prihodko, L., & Goward, S. (1997). Estimation of air temperature from remotely sensed surface

- observations. *Remote Sensing of Environment*, 60.
- Rogers, A., & Kearney, M. (2004). Reducing signature variability in unmixed coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2317–2335. <https://doi.org/10.1080/01431160310001618103>
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación Ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *EURE*, 31(94), 21. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612005009400006>
- Santana, L. M., Escobar, L. A., & Capote, P. A. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 95(45), 77–95. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>
- Sanz, J. (1991). *Evaluación y Corrección de Impactos Ambientales*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid. Madrid.
- Satellite Imaging Corporation. (2015). Sentinel-2A Satellite Sensor (10m).
- Sellers, C. (2012). Publicación de Contaminantes Atmosféricos de la Estación de Monitoreo de la Ciudad de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC. Recuperado de [http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/links_doc_contaminantes/Articulo Chester Sellers EMOV_EP.pdf](http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/links_doc_contaminantes/Articulo_Chester_Sellers_EMOV_EP.pdf)
- Stein, M. L. (2012). *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*. Springer New York. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=aZXwBwAAQBAJ>
- Thomas, G., & Osseiran, N. (2014). Air quality deteriorating in many of the world's cities. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-quality/en/>
- Universidad de Azuay. (2009). *Índice de Calidad Ambiental Urbano*. Cuenca.
- Velázquez, G., & Celemin, J. (2011). Aplicación de un índice de calidad ambiental a la región Pampeana Argentina. *Finisterra*, 91, 18.
- Velázquez de Castro, F. (2001). *El Ozono: ¿cuándo protege y cuando destruye?* Madrid, España: McGraw-Hill.
- Vigouroux, C., De Mazière, M., Demoulin, P., Servais, C., Hase, F., Blumenstock, T., ... Woods, P. (2008). Evaluation of tropospheric and stratospheric ozone trends over Western Europe from ground-based FTIR network observations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8(2), 5007–5060. <https://doi.org/10.5194/acpd-8-5007-2008>
- Weng, Q. (2001). A remote sensing – GIS evaluation of urban expansion and its impact on



- surface temperature in the Zhujiang Delta , China. *Int. J. Remote Sensing*, 22(10), 1999–2014. <https://doi.org/10.1080/713860788>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Wilson, J., Clay, M., Martin, E., Stuckey, D., & Vedder-Risch, K. (2003). Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 86, 20. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00084-1)
- Wiseman, E. (2007). Surviving in an Urban Soil.
- Wong, N. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29.
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106, 12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>

8. Anexos

Anexo 1: Estaciones de monitoreo de calidad del aire (NO₂ y O₃)

ESTACIÓN	CÓDIGO	X	Y
Escuela Velazco Ibarra	EVI	720897	9678191
Mercado el Arenal	MEA	719541	9679928
Facultad de Odontología	ODONT	723520	9678430
Colegio Herlinda Toral	CHT	724196	9680344
Terminal Terrestre	TET	723343	9680506
Municipio	MUN	722201	9679917
Escuela Ignacio Escandón	EIE	718810	9677826
Colegio Rafael Borja	CRB	717092	9677308
Balzay	BAL	718544	9680491
Escuela Ignacio Andrade	EIA	726318	9680505
Colegio Carlos Arizaga	CCA	724843	9681822
Escuela Carlos Crespi	ECC	722744	9681998
Escuela Héctor Sempertegui	EHS	724612	9683855
Bomberos	BCB	722204	9679931
Calle Larga	LAR	722071	9679467
Vega Muñoz	VEG	722195	9680413
Machangara	MAN	728202	9681596
Cebollar	CEB	720000	9681100
Misicata	MIS	717100	9678153

Anexo 2: Registro de concentraciones de NO₂ y O₃ para los años 2014 y 2015

Registro de NO ₂ para el año 2014													
CÓDIGO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA (µg/m ³)
EVI	16.1	17.9	18.2	22.6	16.6	18.2	20.6	25.2	31.9	21.3	16.2	17	20.1
MEA	24.5	39	25.6	22.1	22.7	18.3	21.9	26.5	33.6	29.1	23.9	23.9	25.9
ODON	18.5	33.6	18.9	18.5	15.6	12.9	17.9	18.2	26.4	23	15.8	17.6	19.7
CHT	21	34.9	21.9	19	17.8	16.9	19.2	22.3	27.1	26.7	15.5	19.9	21.8
TET	28.9	17.7	28	26.2	26.6	17.5	26.7	31.7	38.4	26.1	27.3	29.1	27
MUN	21.1	11.7	21.4	22.4	20.7	16.9	21	26.2	32.4	26.5	19	19.1	21.5
EIE	20.2	21.9	20.1	18.2	19.4	15.8	20.6	22.9	30	19.8	20	20.8	20.8
CRB	13.9	28.9	13.8	16.7	13.3	14.4	14.4	18.6	20.9	24.6	8.8	10.7	16.6
BAL	15.3	13	15.6	14.1	14.2	12.5	14.2	15.2	24.4	21.6	12.6	15.7	15.7
EIA	17.3	17.3	15.6	13.4	14.7	15	16.7	18.8	24.4	24.6	15.4	16.5	17.5
CCA	21.9	22.8	22.7	20.6	19.7	15	21.2	25.9	30.8	26.2	21.8	23.2	22.7
ECC	17.7	18.9	16.2	18	14.4	9.2	13.2	17.6	19.3	21.1	17	16.3	16.6
EHS	11.7	13.2	11.2	9.5	9.1	6.2	8.6	10.6	12.3	13.9	12.3	9.7	10.7
BCB	39	20.2	28.6	37.1	41.3	26.1	34.1	37.7	56.3	50.7	46.9	29.9	37.3
LAR	33.6	13.9	23	31.5	31.2	20.8	28.1	35.1	41.3	41.2	36.5	31	30.6
VEG	34.9	35.3	28.8	32.3	32.5	23.3	33.3	42	51.7	44.3	34.3	36.8	35.8
MAN	15.5	15.3	16.6	15.6	12.9	11.1	14.1	15.3	21.2	20.3	12.8	15.3	15.5
CEB	18.3	18.3	15.7	17.2	17.5	7.3	13.5	13.7	21.6	22.6	16.1	16.4	16.5
MIS	17.2	21.9	14.3	13.8	12	12.6	12.4	14.4	18.9	16.8	9.3	10.3	14.2

Registro de NO ₂ para el año 2015													
CÓDIGO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA (µg/m ³)
EVI	17.8	12.7	17.8	19.7	18.3	18.4	20.7	21.7	25.6	25.3	23.7	25.3	20.58
MEA	21.5	18.6	22	22.3	20.8	19.7	23.5	24.3	32.7	30.9	30.9	31.7	24.9
ODON	13.5	11.1	14.3	17.3	13.1	13	14.1	17	17.9	16.4	22.3	21.8	15.99
CHT	13.7	12.4	16.4	18.1	14.8	15.7	17.9	17.4	21.6	20.2	23	24.2	17.95
TET	21.6	21.6	25.7	22.8	20	23.5	22.5	29.2	30.2	30.2	28.7	30.8	25.58
MUN	16.8	13.9	21.4	17	17	16	17.5	20.4	27	25.4	22.9	26.1	20.1
EIE	20.1	16	19.9	19.9	19.3	19.1	20.5	23.6	29.6	25.4	25.2	25.9	22.04
CRB	15.5	11.5	11	14.8	16.5	14.1	16.4	19.1	29.8	24.6	16.7	18.7	17.39
BAL	11.6	11.3	14.1	14.4	14	10.2	16	15.7	24.6	19.8	20.7	18.3	15.89
EIA	13.1	11.4	15.6	16.7	13.5	13.1	14.8	16.6	19.7	21.5	22.8	22.3	16.76
CCA	17.2	17.9	21.3	18.4	18	18.8	19	21.9	29.8	28.9	28.6	28.4	22.35
ECC	12.7	11.9	14.3	12.7	10.3	10.8	11.3	13	17.2	19.4	23.4	22.1	14.93
EHS	7.7	8.3	10.4	9.3	8.1	5.8	6.1	10.1	6.9	10.4	18.1	14	9.6
BCB	34.3	34.8	38.2	33.8	31.1	30.1	34.3	36.8	48.3	40.9	47.9	41.8	37.68
LAR	26.8	26.3	31.3	26.6	24.6	24.1	26.4	28	38.1	33.7	42	35.4	30.28
VEG	32.9	29	36.3	31.4	31.7	29.6	32.7	37.6	51.9	46.2	47.2	46.7	37.77
MAN	11	9.3	13.4	14.3	10.7	11.2	11.4	13.2	16.3	14.1	20.2	18.3	13.63
CEB	11.7	11.9	14.3	14.7	12.6	10.4	13.7	13.3	20.8	22.9	18	17.4	15.13
MIS	12.1	8.6	11.5	13.1	13.1	11.6	14.6	22.3	15.8	13.8	17.7	18.5	14.4

Registro de O ₃ para el año 2014													
CÓDIGO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA (µg/m ³)
EVI	66.5	49.6	65.3	28.1	52.2	49.2	31.7	40.9	38.9	49.4	39.4	27.9	44.9
MEA	29.6	32.9	29.7	13	26.6	21.6	22	27.4	30.1	29	28.5	31	26.8
ODON	45.5	53.1	49.8	32.5	48.5	33	36.3	40.9	41.8	47.5	38.5	39.7	42.2
CHT	51.8	44.2	57	46.1	48.7	50.4	37.3	47.3	47.1	50.1	46.1	37.2	46.9
TET	35	33.3	29.6	22.3	26.8	24.1	27.1	26	31.5	33.7	29.9	27.5	28.9
MUN	32.2	33	29.4	18.2	20.8	21.1	22.6	23.2	32.2	32.2	29.1	31.1	27.1
EIE	34.6	33.7	36.5	18.5	31.4	20.4	21.1	32.3	34	32.2	30.4	29.6	29.5
CRB	50	53.7	59.3	25.8	57.1	41.8	25.6	34	46	48.2	39.3	39.2	43.3
BAL	59.7	44.1	58	32.5	43.9	43.8	34.1	45.9	52.6	44.1	46.6	43.3	45.7
EIA	54.3	40.9	49.5	42.1	64.6	42	37	36.3	48.4	48.4	36.5	34.8	44.5
CCA	29	31.7	36.8	36.8	27.5	27.1	20.6	31	31.1	32.3	29	28.1	30.1
ECC	39.1	30.7	29.8	15.6	27.7	26.1	18.4	33.6	31.5	33.8	24.4	26.3	28.1
EHS	39.1	38.8	52.5	35	33.9	47.3	36.3	26.5	57.6	43.2	29.9	34.3	39.5
BCB	54	45.6	60.1	32.6	39.1	39.6	34.4	36.8	43.1	41.7	34.2	41	41.8
LAR	66.4	68	64.1	37	66.7	36.6	47.5	72.9	60.6	65.1	58.8	52.1	58
VEG	39.5	42.5	44.5	33.6	56.9	44.7	37.3	40.1	40.7	42.9	42.4	36.1	41.7
MAN	38.5	47.5	39.7	28.4	38.3	28.4	24.7	33	42.7	46.4	45.9	44.8	38.1
CEB	66.5	49.6	65.3	28.1	52.2	49.2	31.7	40.9	38.9	49.4	39.4	27.9	44.9
MIS	29.6	32.9	29.7	13	26.6	21.6	22	27.4	30.1	29	28.5	31	26.8

Registro de O ₃ para el año 2015													
CÓDIGO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA (µg/m ³)
EVI	35.5	51.3	45.2	32.67	31.33	56.75	33.24	47.4	55.6	48.5	69.95	50.3	46.48
MEA	24.8	34.8	29.9	23.04	23.5	45.76	37.6	48.9	67	49.2	61.16	55.5	41.76
ODON	29.9	47.2	41.8	39.5	33.21	48.1	39.02	48.4	64.4	52.4	55.47	52.2	45.96
CHT	35.1	62.2	53.1	33.82	44.46	47.02	37.45	44.9	61.3	52.6	53.08	54.9	48.33
TET	24.2	33.1	35.2	26.94	22.37	48.42	38.69	44.5	60.2	56.4	60.36	52.7	41.93
MUN	17.6	37.5	31.9	25.09	23.19	38.3	34.56	49	52.4	51.2	55.34	47.9	38.67
EIE	24	32.7	30.9	23.86	22.32	49.77	39.53	44.4	63.9	52.3	60.87	47.6	41.02
CRB	31.2	31.7	42	33.15	28.69	52.49	38.33	40	53.7	46	57.6	48	41.9
BAL	28.5	47.9	49.8	35.92	30.2	44.97	38.1	50.9	68.2	50.5	49.72	55.2	45.83
EIA	37.8	62.6	44.4	36.13	35.12	48.84	35.35	45.9	60.8	52.2	45.04	54.2	46.52
CCA	20.3	38	32.6	25.98	20.16	38.45	34.5	42.5	52.6	51.9	49.97	56.9	38.66
ECC	20.4	32.6	33.5	29.32	29.86	47.1	33.91	50.7	59.5	55.1	46.12	61.6	41.64
EHS	38.9	46	42.8	39.53	28.42	45.96	37.53	36.3	60.1	52.4	53.78	59.4	45.08
BCB	27.9	42.7	42.8	32.51	34.56	47.52	38.93	55.1	68.2	56.4	57.96	56.5	46.76
LAR	42.9	67.9	49.8	40.66	35.96	58.22	42.64	57.9	83.6	73.9	85.69	73.7	59.41
VEG	33.7	53.6	40.2	39.15	31.41	50.08	38.91	43.8	55.8	54	45.27	60.9	45.58
MAN	21.8	50.5	43.8	31.01	22.74	41.57	32.89	44.4	67.8	51	54.18	52.7	42.86
CEB	35.5	51.3	45.2	32.67	31.33	56.75	33.24	47.4	55.6	48.5	69.95	50.3	46.48
MIS	24.8	34.8	29.9	23.04	23.5	45.76	37.6	48.9	67	49.2	61.16	55.5	41.76



Anexo 3: Puntos de monitoreo de ruido

PUNTO	X	Y	ALTURA (msnm)	USO DEL SUELO	CALLE PRINCIPAL	CALLE SECUNDARIA
R-01	721721	9678555	2556	Comercial	Av. del Estadio	José Peralta
R-02	723001	9677653	2507	Residencial Mixta	Av. 10 de agosto	Herrerías
R-03	723741	9680481	2546	Comercial	Av. España	Elia Liut
R-04	721212	9677521	2542	Residencial Mixta	Primero de Mayo	Fray Vicente Solano
R-05	720785	9678879	2550	Comercial Mixta	Av. Remigio Crespo	Ricardo Muñoz
R-06	722986	9678117	2514	Hospitalaria - Educativa	Av. 12 de abril	Av. Paraíso
R-07	731993	9684337	2386	Residencial	A. Cuenca Azogues	Triángulo Challuabamba
R-08	728318	9681797	2421	Residencial	Camino a Paccha	Ucubamba
R-09	727137	9681037	2450	Residencial Mixta	Av. González Suárez	Panamericana
R-10	724599	9681788	2491	Industrial	Octavio Chacón	Cornelio Vintimilla
R-11	724191	9683448	2530	Industrial	Ochoa León	
R-12	724329	9686028	2594	Residencial	Ochoa León	
R-13	715360	9681534	2676	Residencial Mixta	Camino del Tejar	De la Ortiga
R-14	718196	9681999	2769	Industrial	De los Cerezos	
R-15	717283	9680766	2628	Residencial Mixta	Av. Ordoñez Lazo	Monseñor Leónidas Proaño
R-16	722748	9681426	2584	Residencial	Julio Jaramillo	Vía a Sinincay
R-17	720554	9681024	2665	Residencial Mixta	Av. Del Chofer	Av. Abelardo J, Andrade
R-18	725521	9679249	2480	Hospitalaria - Educativa	Circunvalación Norte	Monay-Paccha
R-19	724033	9679344	2503	Residencial Mixta	Paseo de los Cañaris	González Suárez
R-20	720620	9679768	2558	Hospitalaria - Educativa	Paseo Tres de Noviembre	Simón Bolívar
R-21	719514	9679585	2581	Mixta	Américas	Remigio Crespo
R-22	719833	9678061	2597	Hospitalaria - Educativa	Lope de Vega	Gaspar de Jovellanos
R-23	718334	9677993	2597	Residencial Mixta	Av. De las Américas	Av. Don Bosco
R-24	717847	9676547	2597	Residencial Mixta	Av. De las Américas	Circunvalación Sur
R-25	721467	9679818	2572	Comercial	Tarqui	Gran Colombia
R-26	722061	9680588	2593	Residencial	Luis Cordero	Juan de Salinas
R-27	722708	9679764	2552	Comercial Mixta	Huayna Cápac/España	Gaspar Sangurima
R-28	717243	9677208	2608	Residencial	Juan Larrea Guerrero	Mariano Villalobos
R-29	721685	9679160	2556	Comercial Mixta	Calle Larga	Benigno Malo
R-30	725196	9680358	2529	Residencial	Totoracocha	Del Cóndor

Anexo 4: Registros de ruido para los años 2014 y 2015

PUNTO	Media 2014 (dB)	Media 2015 (dB)
R-01	68,82	71,7
R-02	72,80	73,1
R-03	70,32	66,3
R-04	67,02	71,0
R-05	72,53	73,5
R-06	66,13	71,4
R-07	72,08	75,2
R-08	64,10	70,4
R-09	63,40	72,0
R-10	73,17	73,6
R-11	67,48	70,0
R-12	64,33	65,4
R-13	57,63	61,6
R-14	67,68	70,0
R-15	67,25	73,2
R-16	68,18	67,4
R-17	69,42	73,2
R-18	69,25	76,5
R-19	69,17	74,3
R-20	74,07	73,7
R-21	63,23	74,3
R-22	60,80	62,0
R-23	73,10	73,5
R-24	73,17	76,1
R-25	72,18	73,9
R-26	69,97	73,2
R-27	68,00	73,1
R-28	55,20	60,7
R-29	74,17	74,1
R-30	65,57	68,1

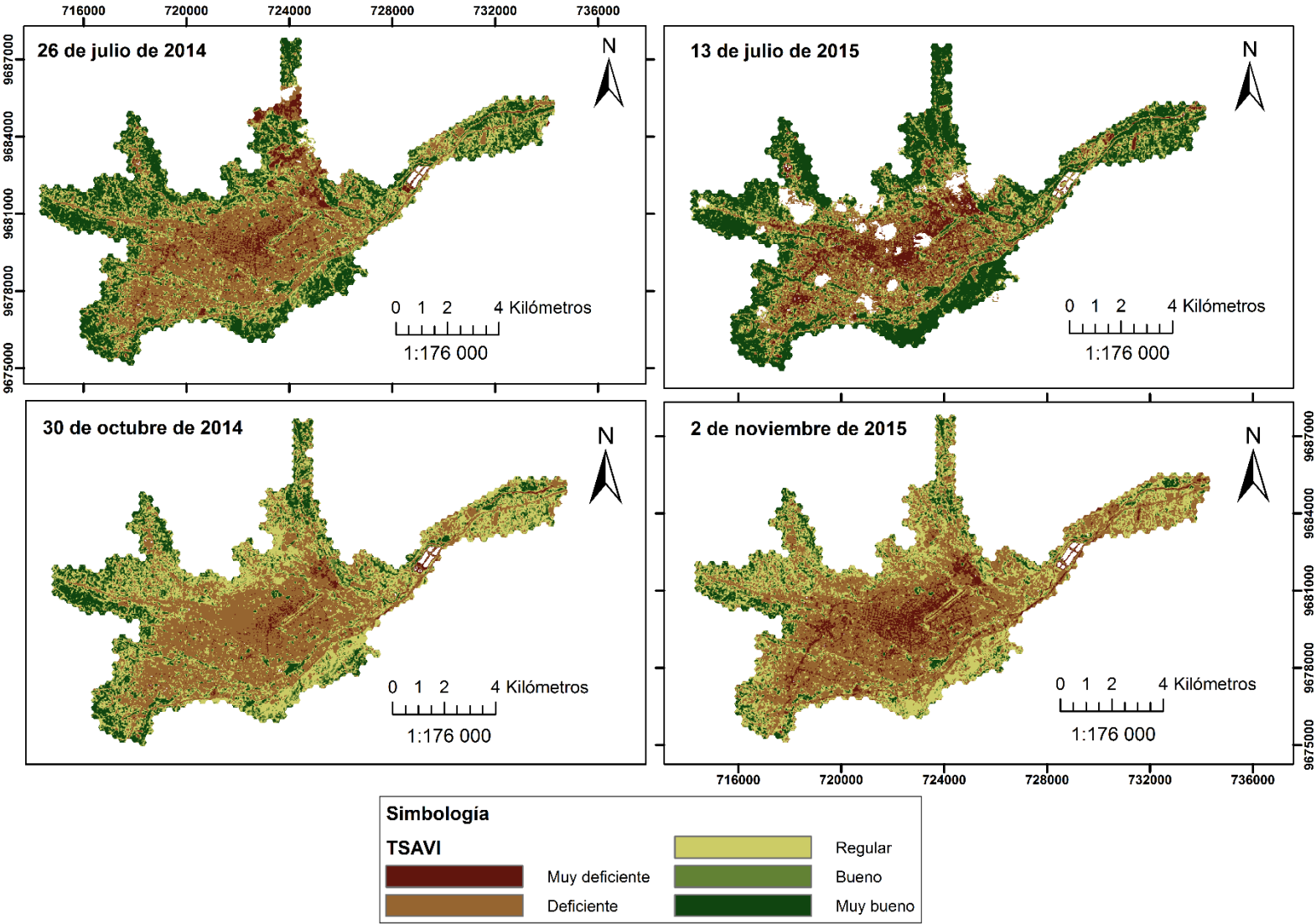
Anexo 5: Valores extraídos para la banda RED y NIR para la determinación del índice TSAVI

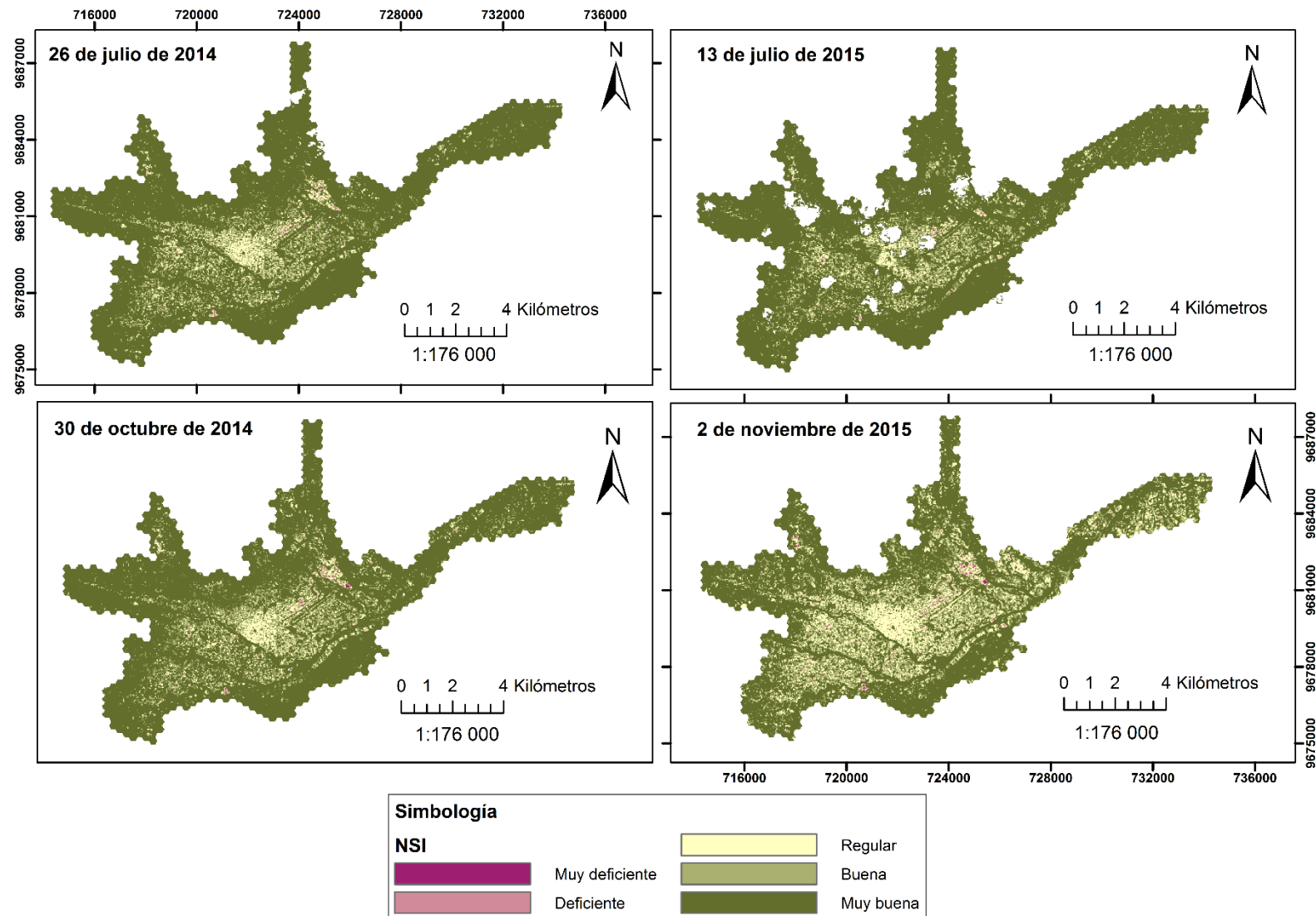
PUNTO	26/7/2014		30/10/2014		13/7/2015		2/11/2015	
	NIR	RED	NIR	RED	NIR	RED	NIR	RED
1	0.25	0.15	0.25	0.15	0.04	0.03	0.18	0.12
2	0.17	0.12	0.24	0.14	0.19	0.12	0.23	0.15
3	0.19	0.14	0.23	0.14	0.19	0.13	0.22	0.14
4	0.26	0.16	0.21	0.12	0.18	0.13	0.19	0.12
5	0.2	0.14	0.25	0.15	0.24	0.15	0.19	0.13
6	0.2	0.13	0.23	0.14	0.21	0.15	0.22	0.15
7	0.17	0.12	0.22	0.13	0.35	0.24	0.24	0.15
8	0.24	0.17	0.25	0.15	0.24	0.17	0.21	0.14
9	0.23	0.16	0.23	0.13	0.4	0.26	0.22	0.14
10	0.19	0.13	0.24	0.14	0.05	0.04	0.2	0.14
11	0.18	0.13	0.21	0.13	0.2	0.14	0.18	0.12
12	0.21	0.15	0.23	0.14	0.2	0.15	0.18	0.12
13	0.23	0.16	0.28	0.17	0.23	0.16	0.29	0.19
14	0.21	0.15	0.19	0.11	0.22	0.16	0.19	0.13
15	0.17	0.12	0.22	0.13	0.27	0.2	0.21	0.13
16	0.19	0.13	0.25	0.14	0.04	0.03	0.23	0.16
17	0.22	0.15	0.21	0.13	0.22	0.18	0.24	0.16
18	0.21	0.15	0.23	0.14	0.21	0.13	0.24	0.15
19	0.21	0.13	0.26	0.15	0.2	0.13	0.27	0.17
20	0.24	0.17	0.21	0.13	0.23	0.16	0.18	0.13
21	O2	0.12	0.27	0.16	0.19	0.13	0.23	0.15
22	0.21	0.15	0.24	0.14	0.23	0.14	0.21	0.15
23	0.2	0.13	0.28	0.16	0.22	0.13	0.22	0.14
24	0.19	0.12	0.23	0.14	0.2	0.13	0.25	0.17
25	0.17	0.12	0.25	0.15	0.36	0.25	0.21	0.15
26	0.22	0.14	0.25	0.14	0.23	0.16	0.22	0.15
27	0.22	0.15	0.23	0.13	0.22	0.16	0.23	0.15
28	0.27	0.17	0.23	0.14	0.27	0.17	0.23	0.16
29	0.21	0.15	0.22	0.14	0.22	0.14	0.22	0.16
30	0.2	0.13	0.23	0.13	0.21	0.12	0.2	0.13
31	0.19	0.13	0.19	0.12	0.19	0.14	0.2	0.13
32	0.16	0.1	0.22	0.14	0.06	0.05	0.18	0.13
33	0.28	0.17	0.23	0.13	0.17	0.12	0.18	0.12
34	0.18	0.13	0.22	0.14	0.25	0.19	0.19	0.13
35	0.19	0.13	0.19	0.12	0.05	0.04	0.21	0.15
36	0.21	0.15	0.3	0.18	0.18	0.13	0.2	0.14
37	0.22	0.15	0.25	0.16	0.22	0.15	0.19	0.13
38	0.14	0.1	0.21	0.12	0.03	0.03	0.22	0.14
39	0.15	0.11	0.27	0.15	0.05	0.04	0.21	0.14
40	0.24	0.16	0.28	0.16	0.05	0.04	0.25	0.16

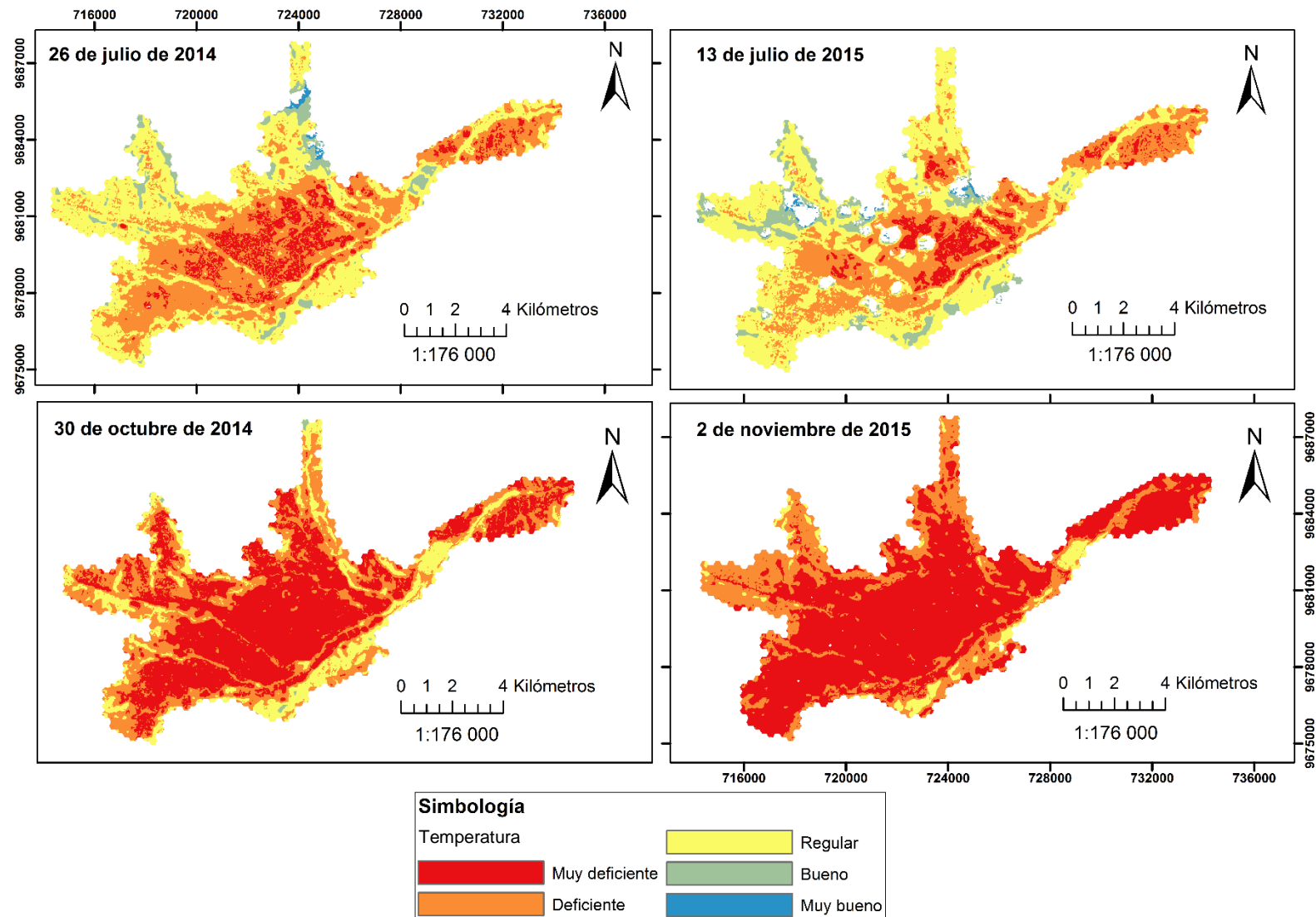
Anexo 6: Valores extraídos de las bandas NIR y SWIR para definir valores NIR_{FT} y $SWIR_{FT}$

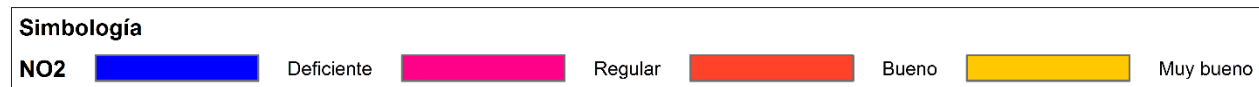
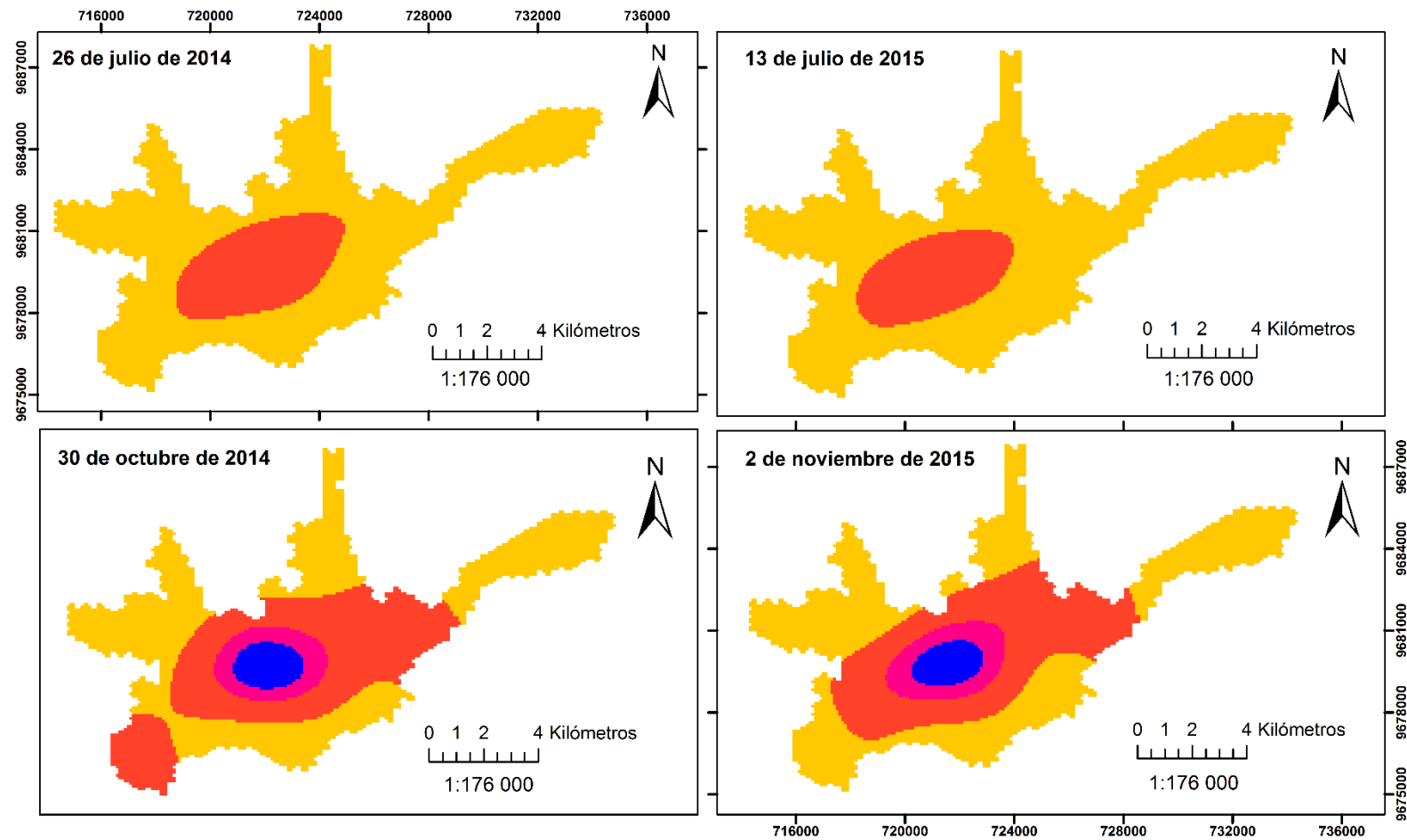
PUNTO	26/7/2014		30/10/2014		13/7/2015		2/11/2015	
	NIR	SWIR	NIR	SWIR	NIR	SWIR	NIR	SWIR
1	0.46	0.22	0.38	0.19	0.48	0.26	0.41	0.19
2	0.45	0.2	0.37	0.24	0.47	0.22	0.36	0.26
3	0.44	0.19	0.37	0.23	0.42	0.2	0.34	0.14
4	0.43	0.23	0.35	0.13	0.42	0.18	0.33	0.25
5	0.43	0.21	0.34	0.18	0.37	0.22	0.3	0.25
6	0.4	0.14	0.33	0.25	0.36	0.2	0.27	0.25
7	0.39	0.22	0.3	0.24	0.36	0.23	0.27	0.26
8	0.36	0.2	0.27	0.23	0.35	0.15	0.25	0.11
9	0.32	0.11	0.3	0.19	0.31	0.22	0.25	0.16
8	0.32	0.22	0.29	0.22	0.28	0.11	0.24	0.23
9	0.31	0.19	0.26	0.2	0.28	0.23	0.24	0.24
10	0.3	0.21	0.25	0.25	0.27	0.1	0.23	0.19
11	0.28	0.22	0.24	0.21	0.24	0.11	0.22	0.25
12	0.24	0.16	0.23	0.17	0.22	0.13	0.2	0.27
13	0.24	0.12	0.2	0.11	0.2	0.11	0.19	0.18
14	0.21	0.13	0.18	0.21	0.18	0.11	0.16	0.13
15	0.19	0.14	0.16	0.1	0.13	0.09	0.13	0.11
16	0.13	0.09	0.13	0.09	0.12	0.08	0.11	0.09

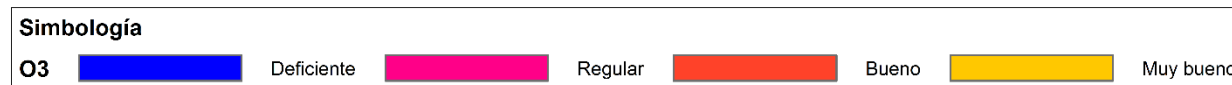
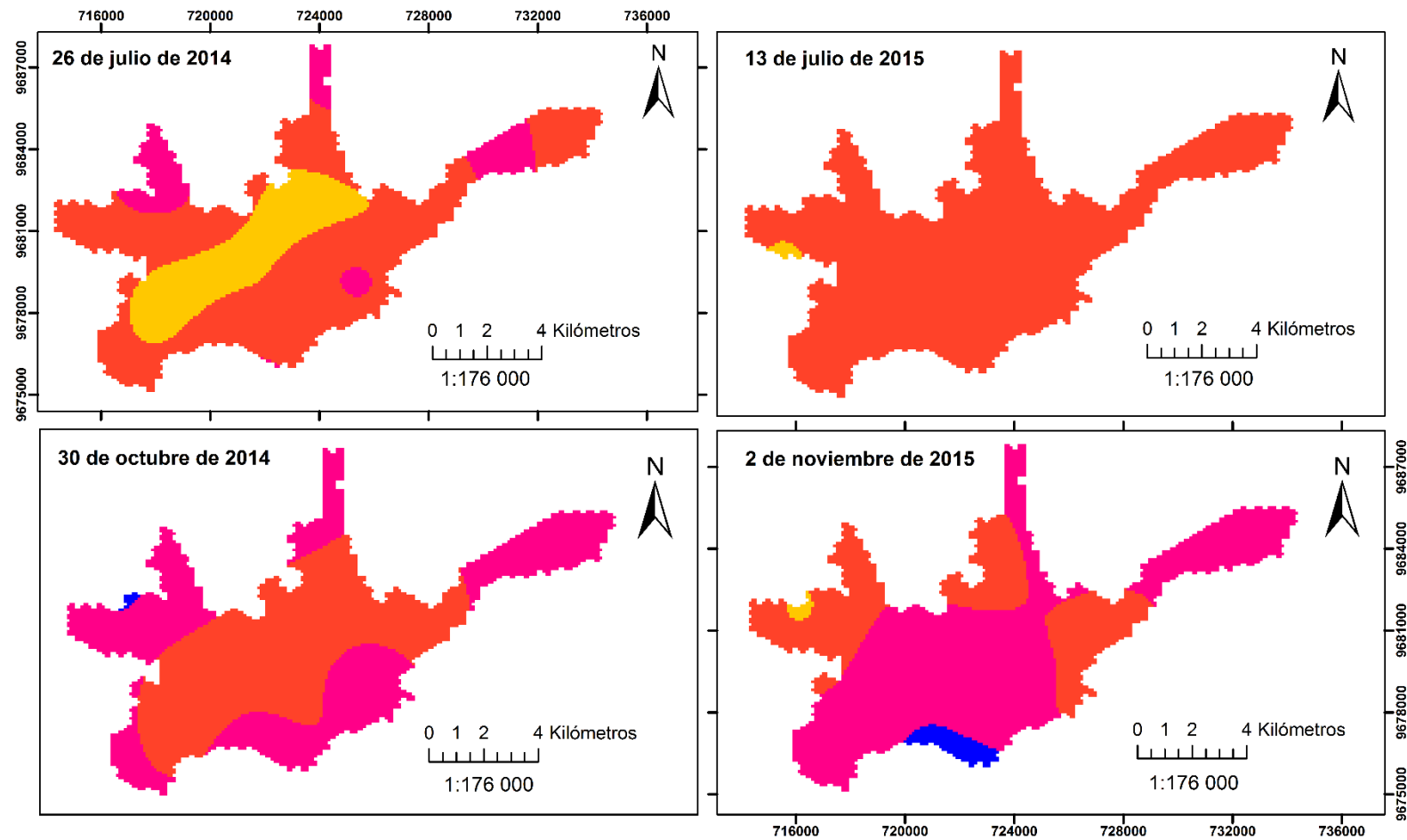
Anexo 7: Indicadores de estudio reclasificados

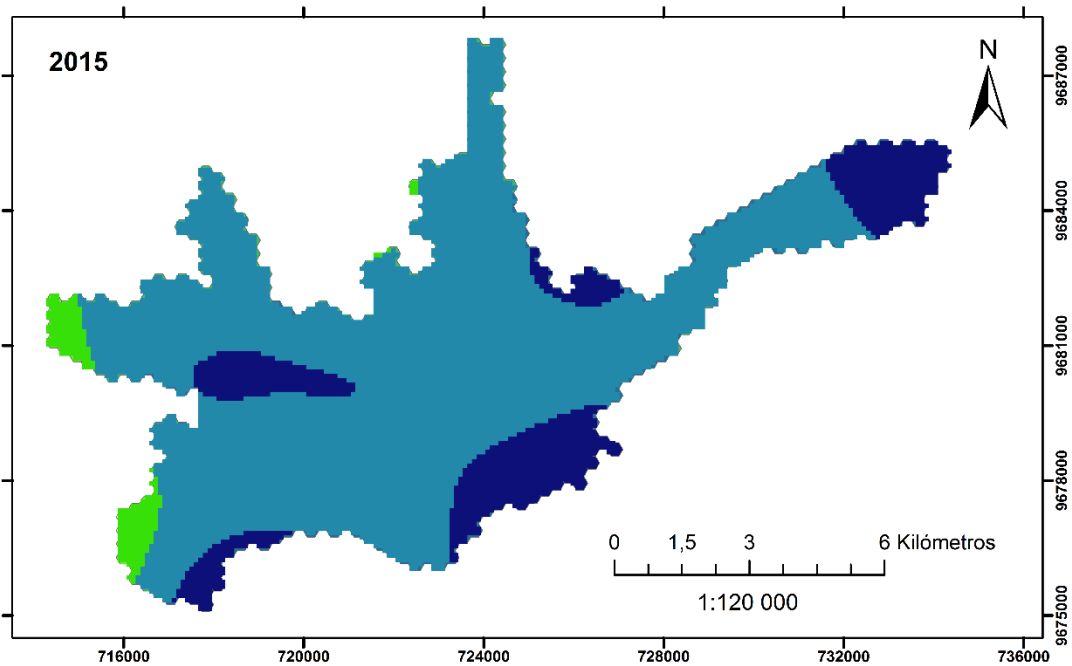
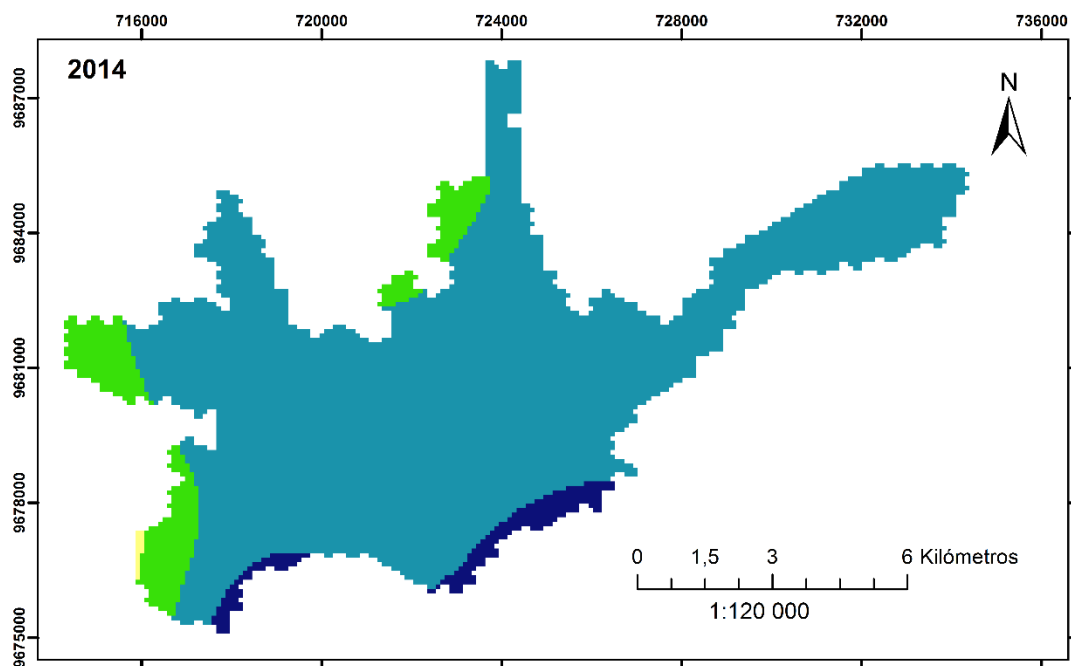








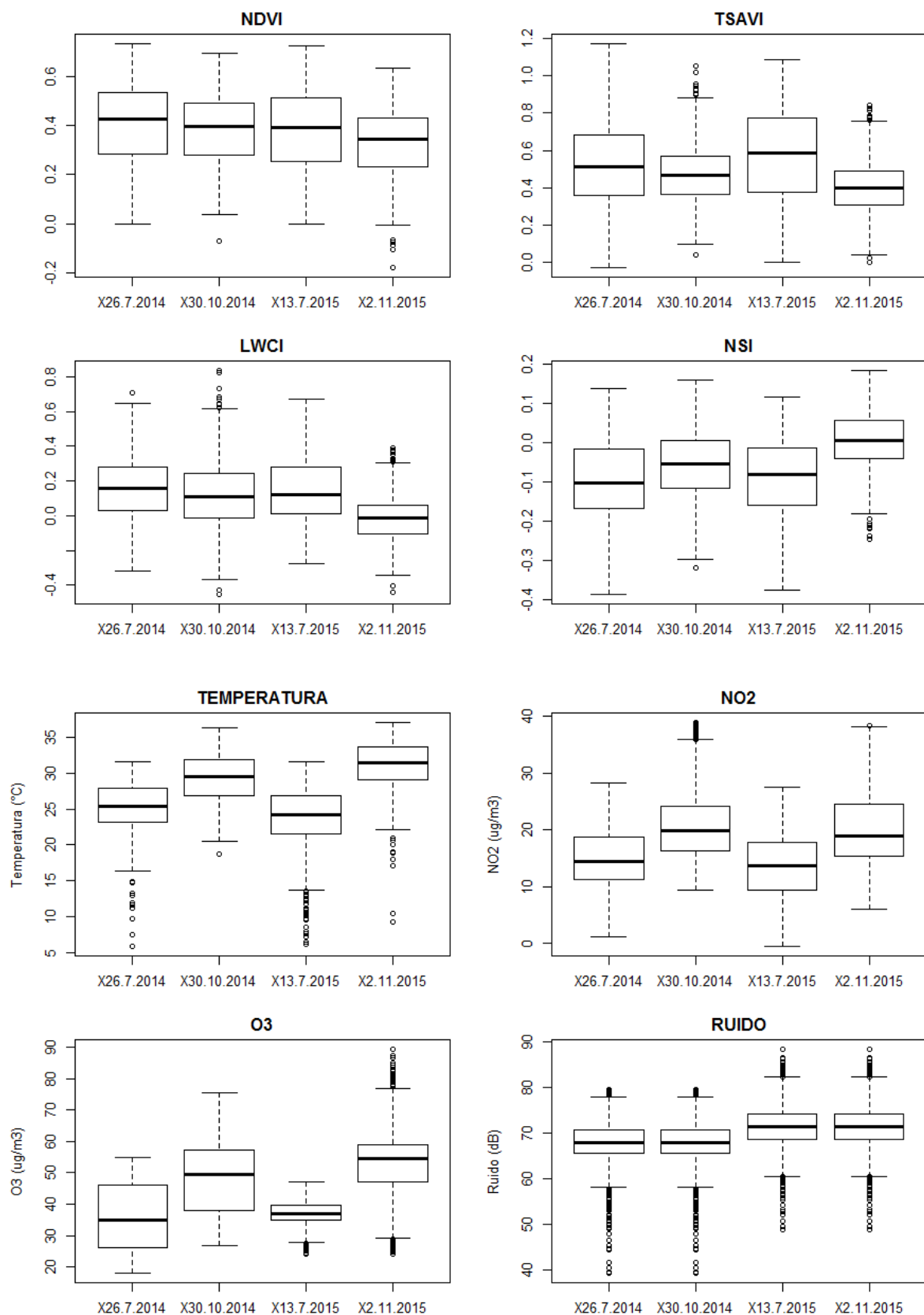




Simbología

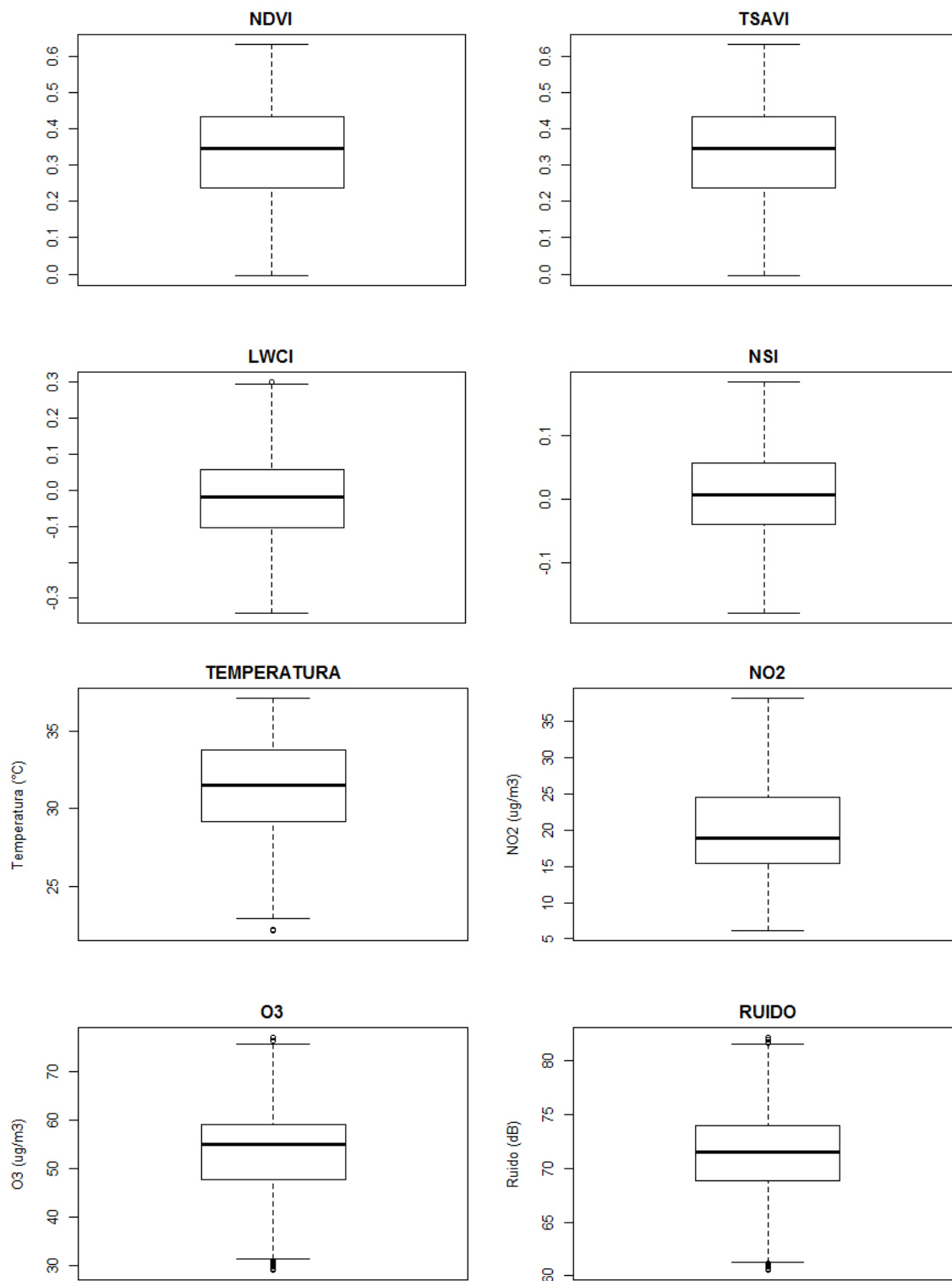
Ruido Muy deficiente Deficiente Regular Bueno

Anexo 8: Diagramas de caja para los indicadores generados



Anexo 9: Análisis de outliers para la imagen del 2 de noviembre de 2015

Para proceder con el análisis de influencia de los valores fuera de rango, se procedió a eliminar los mismos de cada una de las variables o indicadores generados, obteniendo a su vez los siguientes diagramas de caja de los datos:



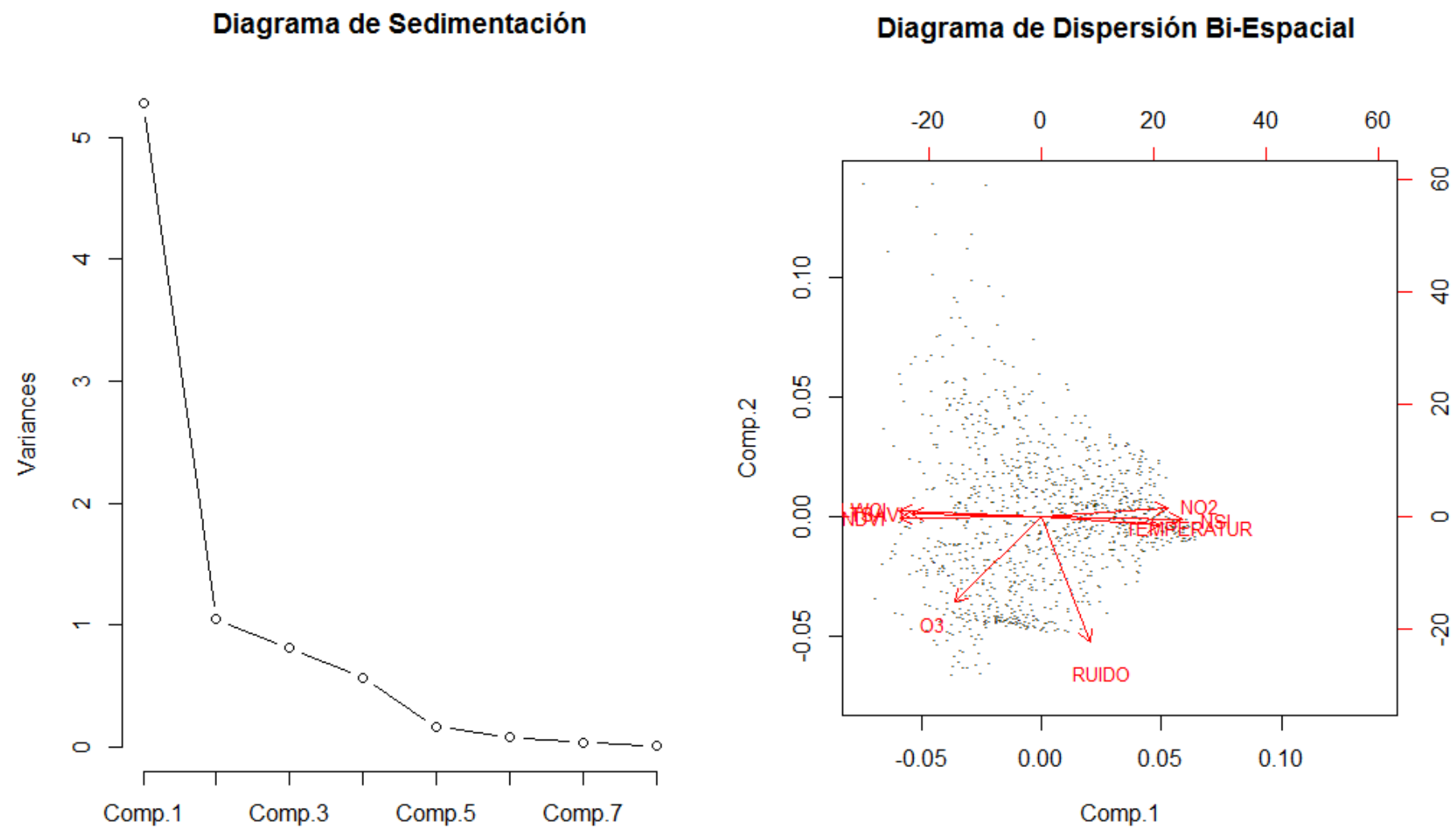
Una vez analizados y eliminados los valores fuera de rango, se vuelve a armar la base de datos, eliminando aquellas celdas que contengan en al menos una variable un valor fuera de rango, generando una base con 956 observaciones, a diferencia de las 1098 originales, eliminando por tanto 142 celdas de la malla hexagonal. A partir de la nueva base de datos se realiza un ACP, generando los siguientes resultados:

Variable	ICA-2Nov2015-sin outliers		
	Peso CP1	Comunalidad	KMO individual
NDVI	0.96	0,912	0,78
TSAVI	0.93	0,874	0,74
LWCI	0.94	0,877	0,74
NSI	-0.94	0,885	0,74
TEMPERATUR	-0.86	0,74	0,85
NO2	-0.77	0,6	0,96
O3	-0.47	0,223	0,81
RUIDO	-0.26	0,069	0,66
Auto-valor	5.1793		
% Varianza	64.7		
KMO general	0.78		

Como se puede observar, el auto-valor aumenta con respecto al valor correspondiente al 2 de noviembre de 2015 en la Tabla 15, por tanto el porcentaje de varianza en un 3%, al igual que el índice KMO global que aumenta en 0.01. De igual manera se observa un cambio en los pesos, sin embargo, estos cambios no son significativos frente a los generados con los datos originales. Por último, se calculó el coeficiente de determinación entre las calificaciones obtenidas para esta imagen con los datos originales y los datos sin *outliers*, obteniendo un valor de 0.9997, determinando por tanto, que la diferencia es mínima.

Se puede concluir, entonces, que los outliers no influyen en la determinación del índice, prefiriendo mantenerlos para evitar la pérdida de 142 celdas de información al momento de determinar el ICA.

Anexo 10: Diagramas de sedimentación y de dispersión bi-espaciales del ACP para cada fecha de estudio



26 de julio de 2014

Diagrama de Sedimentación

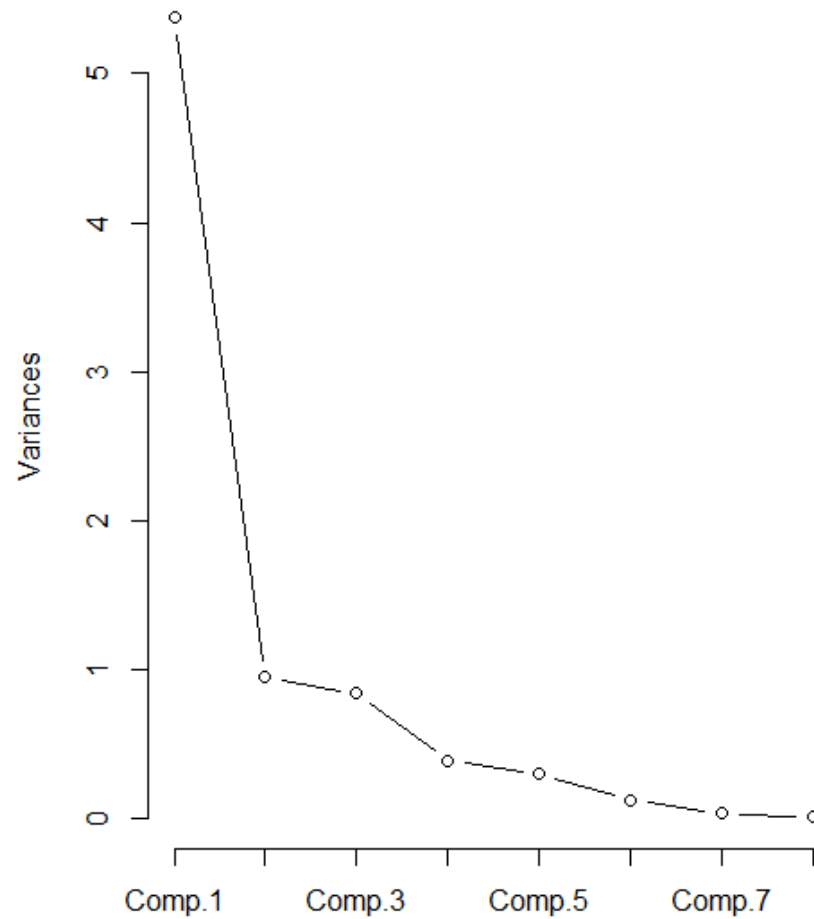
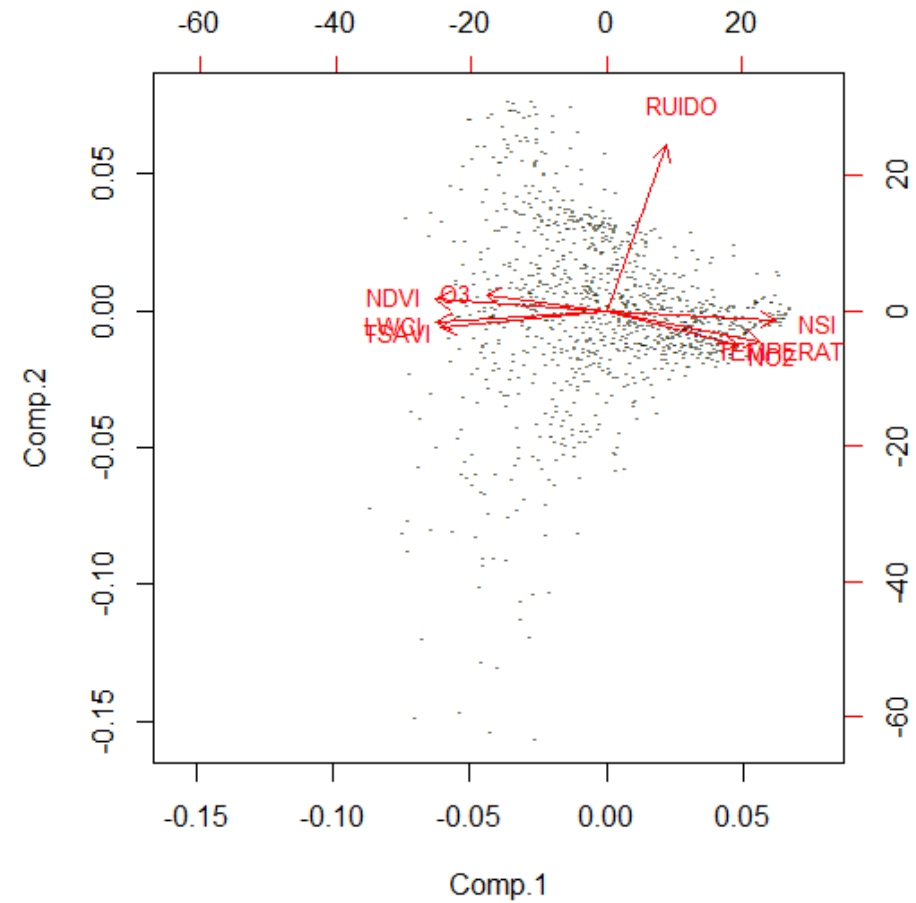


Diagrama de Dispersión Bi-Espacial



30 de octubre de 2014

Diagrama de Sedimentación

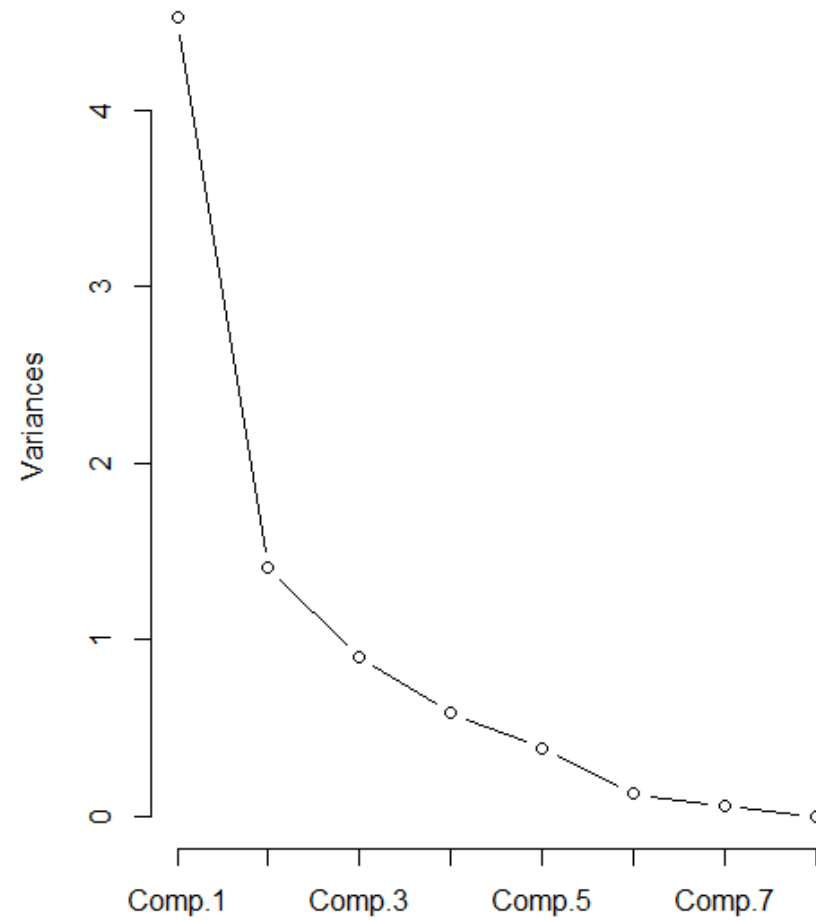
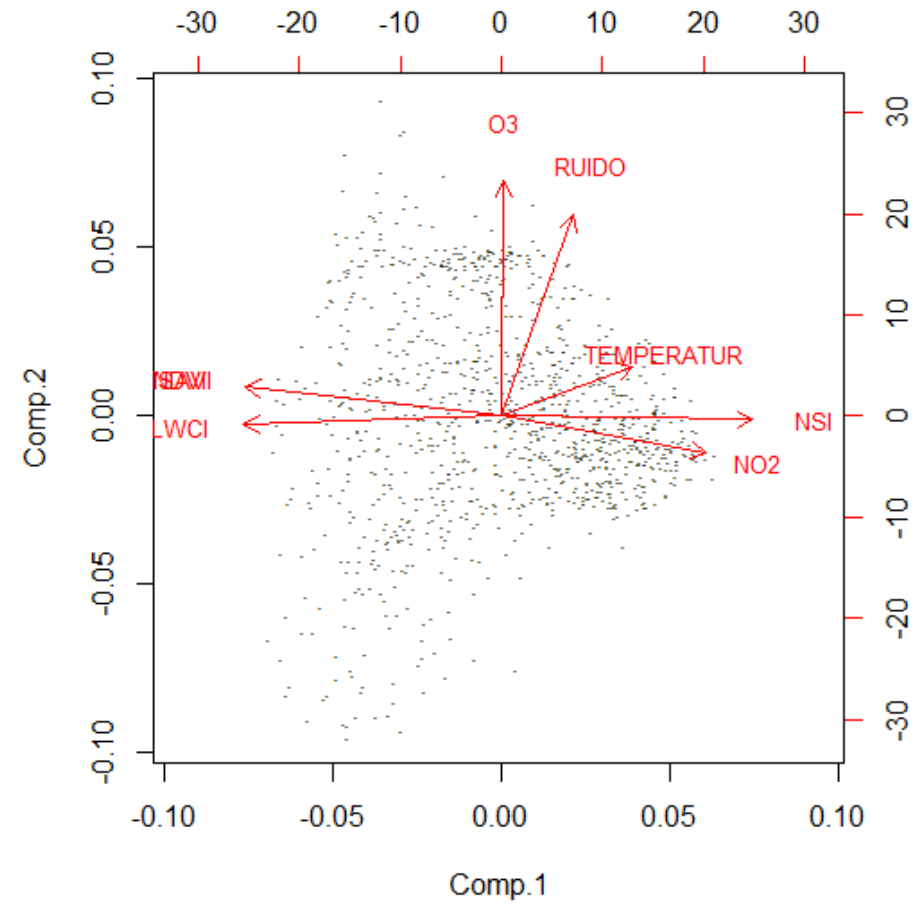


Diagrama de Dispersión Bi-Espacial



13 de julio de 2015

Diagrama de Sedimentación

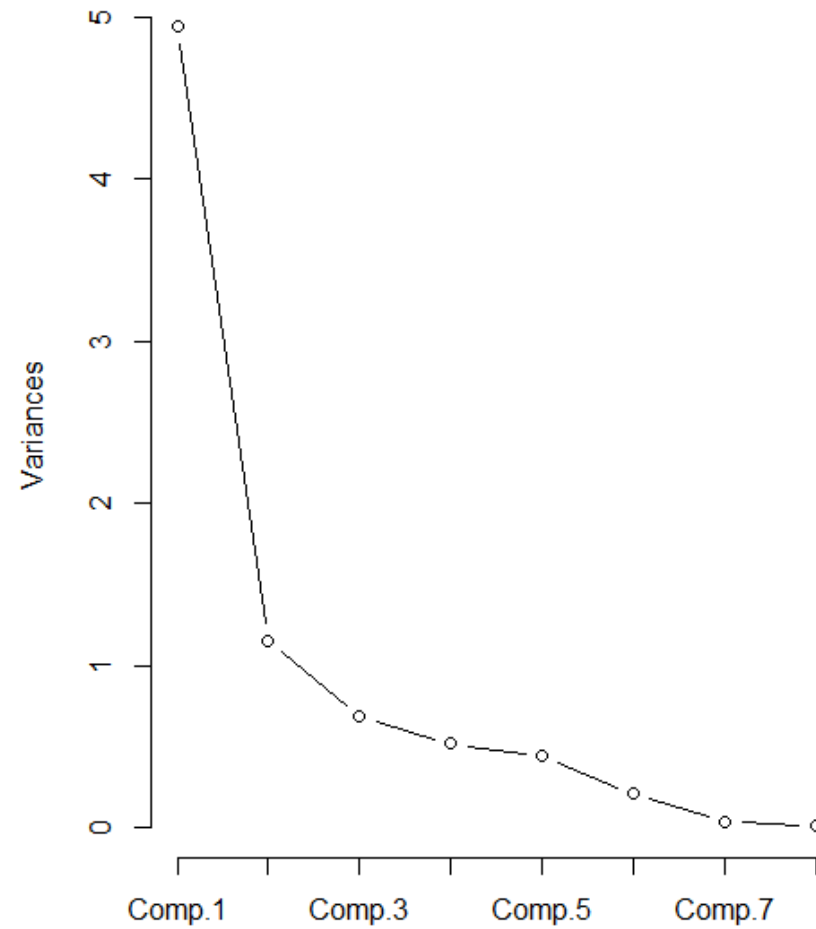
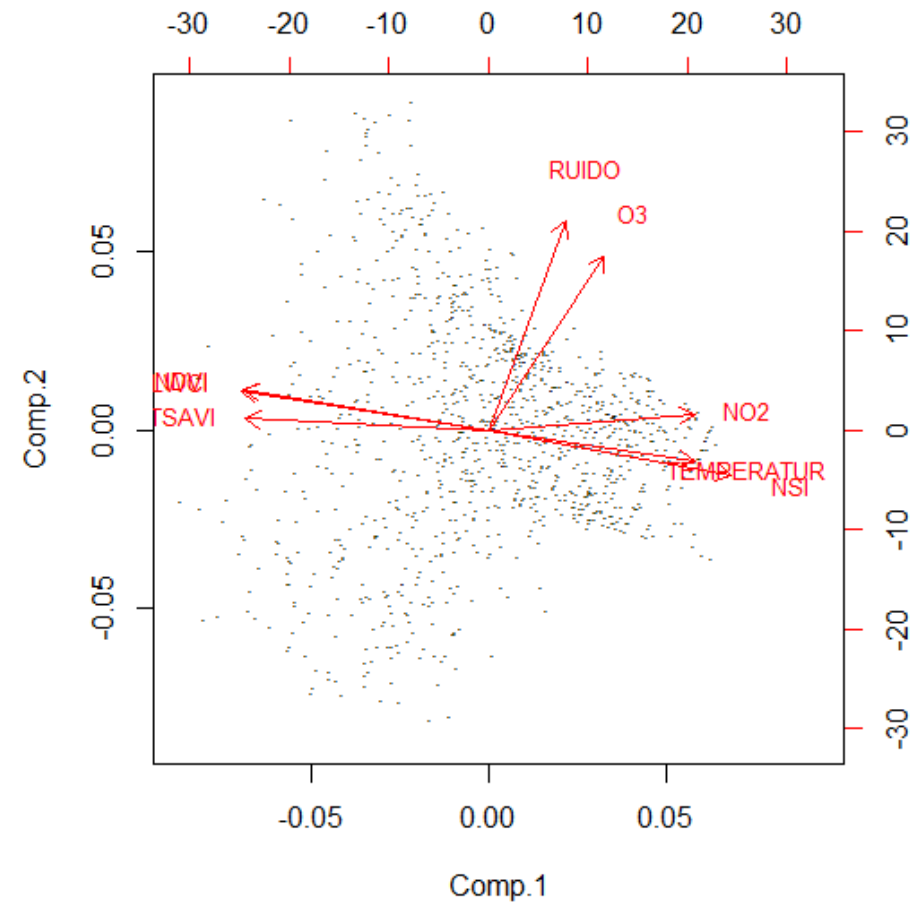


Diagrama de Dispersión Bi-Espacial



2 de noviembre de 2015